

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Vektorový obvodový analyzátor a jeho použití ve výuce

Vector Network Analyser and its Usage in Lectures

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Macák

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Vektorový obvodový analyzátor a jeho použití ve výuce
Vector Network Analyser and its Usage in Lectures

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Laboratoř rádiových sítí je vybavena profesionálním vektorovým analyzátořem R&S VNA ZND8. Cílem práce je popsat ovládání přístroje a navrhnout laboratorní úlohu pro měření příslušných parametrů antén.

Vypracovaná práce bude splňovat následující body zadání:

1. Obecný popis funkce obvodového analyzátořu.
2. Popis ovládání a základního nastavené přístroje R&S VNA ZND8 pro měření parametrů antén.
3. Popis používaných kalibračních metod.
4. Návrh měřicí úlohy ověřující vlastnosti antény.
6. Vytvoření názorného návodu ovládání přístroje.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1]BALANIS, Constantine A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd Edition. England: Wiley-Interscience, April 4, 2005. ISBN 978-0471667827.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 21. dubna 2019

.....

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi pomohli s touto bakalářskou prací a hlavně vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za jeho rady a připomínky.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je seznámit čtenáře s vektorovým obvodovým analyzátozem R&S VNA ZND8. V práci je nejprve uvedeno rozdělení jednotlivých obvodových analyzátorů a jejich popis. Zejména je kladen důraz na popis skalárního a vektorového obvodového analyzátoru. V následující části jsou nastíněny parametry antén, které lze změřit vektorovým analyzátozem. Další část práce je věnována kalibraci vektorového analyzátoru a zejména kalibračním metodám. V práci jsou zmíněny všechny v praxi využívané kalibrační metody. Kalibrační metoda OSM (Open-Short-Match) je později použita v praktické části bakalářské práce. Výstupem bakalářské práce je navržené laboratorní měření, které ověřuje vlastnosti vybrané antény a názorný návod, který popisuje ovládání a nastavení přístroje R&S VNA ZND8 pro měření parametrů antén.

Klíčová slova: antény, kalibrační metody, návod, rozptylové parametry, SNA, VNA

Abstract

The main purpose of my Bachelor's thesis is to introduce vector network analyser R&S VNA ZND8 to a reader. First of all, the reader will be familiarized with division of network analysers and their description. Emphasis is mainly laid on description of SNA (Scalar Network Analyser) and VNA (Vector Network Analyser). In the next part are mentioned parameters of antennas, which can be measured by vector network analyser. Next part of my thesis is dedicated to calibration of vector network analyser with the main focus on describing calibration methods. In thesis are mentioned all calibration processes, which are used in practice. Calibration process OSM (Open-Short-Match) is later on used in practical part of my thesis. The output of thesis is created laboratory measurement, which verifies properties of chosen antenna and graphic operating manual, which describes control and configuration of R&S VNA ZND8 for measuring parameters of antennas.

Key Words: antennas, calibration processes, manual, scattering parameters, SNA, VNA

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Úvod	10
1 Obvodový analyzátor	11
1.1 Základní architektura obvodového analyzátoru	11
1.2 Skalární obvodový analyzátor	12
1.3 Vektorový obvodový analyzátor	15
2 Základní měřitelné parametry	20
2.1 Z-parametry	20
2.2 Y-parametry	21
2.3 S-parametry	22
2.4 Odvozené parametry u dvojbranu	24
3 Kalibrace obvodového analyzátoru	27
3.1 Chyby měření	27
3.2 Chybový model vektorového obvodového analyzátoru	29
3.3 Kalibrační standardy	31
3.4 Kalibrační metody	33
3.5 Kalibrační sady	39
3.6 Typy kalibračních postupů	41
3.7 Praktická doporučení k přesnému měření	43
4 Náznorné návody na nastavení analyzátoru ZND8	45
4.1 Průvodce základním nastavením analyzátoru R&S VNA ZND8	45
4.2 Průvodce pokročilým nastavením analyzátoru R&S VNA ZND8	45
5 Návrh laboratorní úlohy ověřující vlastnosti antény	47
Závěr	48
Literatura	49
Přílohy	53

Seznam použitých zkratk a symbolů

a_n	–	přímá napěťová vlna N-tého portu
B	–	susceptance [S]
b_n	–	odražená napěťová vlna N-tého portu
C	–	Coupling factor (vazební útlum) [dB]
D	–	Directivity (směrovost) [dB]
DDS	–	Direct digital synthesis (přímá digitální syntéza)
DUT	–	Device under test (testované zařízení)
e_{00}	–	chybový koeficient Directivity error
e_{10}	–	chybový koeficient Reflection Tracking error
e_{11}	–	chybový koeficient Source Match error
$e_{00_{eff}}$	–	efektivní chybový koeficient Directivity error
$e_{10_{eff}}$	–	efektivní chybový koeficient Reflection Tracking error
$e_{11_{eff}}$	–	efektivní chybový koeficient Source Match error
g	–	group delay (skupinové zpoždění)
G	–	zisk [dB]
GSM	–	Global System for Mobile Communications
I	–	elektrický proud [A]
I_f	–	izolační faktor [dB]
L	–	vložný útlum [dB]
$L_{hlavní větve}$	–	útlum hlavní větve [dB]
LCR	–	Inductance, Capacitance, Resistance
LRA	–	Line-Reflect-Attenuation
LRL	–	Line-Reflect-Line
LRM	–	Line-Reflect-Match
LTE	–	Long Term Evolution
OSL	–	Open-Short-Load
OSM	–	Open-Short-Match
OSMT	–	Open-Short-Match-Through
P	–	Výkon [W]
PLL	–	Phase-Locked Loop (fázový závěs)
RC	–	resistor-capacitor
RF	–	radio frequency (rádiový kmitočet)
RL	–	Return loss (zpětný útlum)
R&S	–	Rohde & Schwarz
S_{11}	–	vstupní koeficient odrazu [-]
S_{12}	–	zpětný přenosový koeficient [-]

S_{21}	– přenosový koeficient [-]
S_{22}	– výstupní koeficient odrazu [-]
SDR	– Software-defined radio
SMA	– SubMiniature version A
SNA	– Scalar Network Analyser
SOLT	– Short-Open-Load-Through
SOLR	– Short-Open-Load-Reciprocal
SSLR	– Short-Short-Load-Reciprocal
SSLT	– Short-Short-Load-Through
SSSR	– Short-Short-Short-Reciprocal
SSST	– Short-Short-Short-Through
SWR	– Standing Wave Ratio
TNA	– Through-Symmetrical Network-Attenuation
TOM	– Through-Open-Match
TOM-X	– Through-Open-Match-Crosstalk
TOSM	– Through-Open-Short-Match
TRA	– Through-Reflect-Attenuation
TRL	– Through-Reflect-Line
TRM	– Through-Reflect-Match
TSM	– Through-Short-Match
UOSM	– Unknown Through-Open-Short-Match
USB	– Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
V	– napětí [V]
ν_f	– vysokofrekvenční
VCO	– Voltage controlled oscillator (napětím řízený oscilátor)
VNA	– Vector Network Analyser
VNWA	– Vector Network Analyser
VSWR	– Voltage Standing Wave Ratio
Wi-Fi	– Wireless Fidelity
Y_{11}	– vstupní admitance [S]
Y_{12}	– přenos admitance ve zpětném směru [S]
Y_{21}	– přenos admitance v přímém směru [S]
Y_{22}	– výstupní admitance [S]
Z_{in}	– vstupní impedance pro port 1 [Ω]
Z_L, Z_S	– impedance portů dvojbranu [Ω]
Z_0	– charakteristická impedance [Ω]
Z_{11}	– vstupní impedance [Ω]
Z_{12}	– přenos impedance ve zpětném směru [Ω]
Z_{21}	– přenos impedance v přímém směru [Ω]

Z_{22}	– výstupní impedance $[\Omega]$
	–
Γ	– činitel odrazu [-]
$ \Gamma $	– velikost činitele odrazu [-]
$ \Gamma_{port1} $	– velikost činitele odrazu vstupního portu standardu [-]
$ \Gamma_{port2} $	– velikost činitele odrazu výstupního portu standardu [-]
$ \Gamma_{vedení} $	– velikost činitele odrazu vedení [-]
$ \Gamma_{zátěž} $	– velikost činitele odrazu zátěže [-]
τ	– činitel přenosu [-]
ϕ	– fáze $[rad]$
ω	– úhlový kmitočet $[rad \cdot s^{-1}]$

Úvod

V dnešní době většina z nás dennodenně využívá telekomunikačních služeb, které jsou například nabízeny mobilními operátory a internetovými poskytovateli. Především jsou využívány mobilní sítě GSM (Global System for Mobile Communications), LTE (Long Term Evolution) a dále bezdrátové sítě Wi-Fi (Wireless Fidelity). V obou případech hovoříme o rádiových sítích. Obecně vzato existuje nespočet jevů, vlastností a technických prostředků, které zásadně ovlivňují využívání těchto sítí. Ale ze všeho nejdůležitější je mít správně nastavenou, naladěnou a otestovanou anténu příjemce i vysílače pro danou frekvenci používané technologie. Pro testování a ověřování vlastností antén se využívají anténní analyzátory. Jedná se o přístroje, které vám na požadované frekvenci změří základní parametry antény. Tyto analyzátory jsou perfektní při měření antén pro radioamatéry, avšak pokud člověk potřebuje přesnější a detailnější měření nebo měří rozličná vf (vysokofrekvenční) zařízení, tak anténní analyzátory jsou pro tato použití nevhodné. Naštěstí na trhu existují obvodové (především vektorové) analyzátory, které tyto možnosti poskytují. Příkladem takového vektorového analyzátoru je například R&S VNA ZND8, se kterým bude čtenář mé bakalářské práce patřičně seznámen. Cílem práce je především uvést čtenáře do problematiky obvodových vektorových analyzátorů a dokázat s takovým přístrojem spolehlivě pracovat.

Teoretická část je rozdělena na tři části. V první části bude čtenář seznámen s obvodovými analyzátory. Důraz bude kladen především na popis skalárního a vektorového analyzátoru. Konkrétně z jakých funkčních bloků se skládají, jak jednotlivé bloky fungují a co můžeme měřit těmito analyzátory. Ve druhé části bakalářské práce naleznete popis parametrů testovaných zařízení, které se dají přímo změřit vektorovým analyzátozem (rozptylové parametry), anebo přepočítat na všeobecně známé parametry (zisk, činitel odrazu, zpětný útlum). Ve třetí části bude dále uveden popis kalibrace vektorového obvodového analyzátoru. Zejména zde budou uvedeny jednotlivé kalibrační standardy a metody, které se v praxi používají, a které nám ovlivňují míru chybovosti při měření.

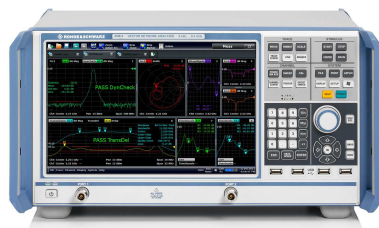
V praktické části je čtenář seznámen s analyzátozem R&S VNA ZND8. Praktická část je rozdělena na tři části. První část tvoří názorný návod, který slouží k popisu ovládání a základního nastavení přístroje R&S VNA ZND8 pro měření parametrů S_{11} a S_{22} dané antény. V návodu jsou představeny i technické parametry přístroje a kalibrační sady, které jsou dostupné v laboratoři EB209. Druhá část obsahuje návod, který slouží k pokročilému nastavení analyzátoru ZND8. Tento návod umožňuje uživateli zefektivnit práci s analyzátozem. V třetí části je uvedeno zadání laboratorní úlohy pro studenty předmětu Radiokomunikační technika 1. Studenti budou mít tak možnost si vyzkoušet práci s profesionálním zařízením R&S VNA ZND8. S analyzátozem budou studenti ověřovat vlastnosti vybrané antény. V rámci navrženého měření je použita kalibrační metoda OSM (Open-Short-Match), která byla popsána v teoretické části bakalářské práce.

1 Obvodový analyzátor

Obvodové analyzátory jsou měřicí přístroje, které lze dnes nalézt v jakékoliv laboratoři, která se zabývá testováním a optimalizováním vf zařízení. S těmito přístroji dokážeme přesně určit parametry různých zařízení pracujících v oblasti vysokých kmitočetů. Můžeme tak měřit a vhodně zobrazit parametry filtrů, zesilovačů, antén, kabelů a dalších i komplexnějších zařízení a vf obvodů. Parametry těchto vf obvodů (například jednobrany, dvojbrany) lze měřit v rozsahu jednotek Hz (umí pouze pár analyzátorů) až stovek GHz. V rámci těchto kmitočetů lze měřit těmito přístroji S-parametry (rozptylové parametry) vf obvodů [1].

V praxi se používají 2 typy obvodových analyzátorů:

1. Skalární obvodový analyzátor (SNA)
2. Vektorový obvodový analyzátor (VNA)



Obrázek 1.1: Vektorový obvodový analyzátor R&S ZNB [2]

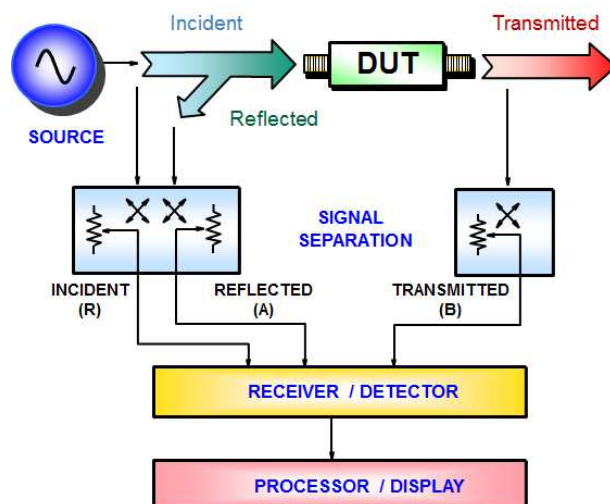
1.1 Základní architektura obvodového analyzátoru

Na obrázku č.1.2 lze vidět společnou architekturu skalárních a vektorových obvodových analyzátorů. Oba analyzátory mají společné funkční bloky. Rozdíl je především v realizaci těchto bloků. Jelikož VNA musí uchovávat informaci i o fázové charakteristice signálu a zároveň poskytuje uživatelskou kalibraci, tak je implementace samotného přístroje mnohem komplikovanější, než je tomu u SNA.

SNA a VNA mají následující funkční bloky [3]:

- Source (RF generátor) - generuje signál, který je přiveden do DUT (Device under test)
- DUT - testovaný vf obvod
- Signal separation - obvody, které slouží k rozdělení přímé vlny (generované vlny šířící se do DUT) a odražené vlny (odražený signál ze vstupu DUT).

- Receiver/Detector - funkční blok, který se využívá k detekování a zpracování odraženého signálu z DUT v obvodovém analyzátoru
- Processor/Display - v tomto bloku je uživateli zobrazen signál z DUT



Obrázek 1.2: Funkční bloky obvodových analyzátorů [4]

Podrobnější popis jednotlivých funkčních bloků můžete nalézt v části 1.3.2.

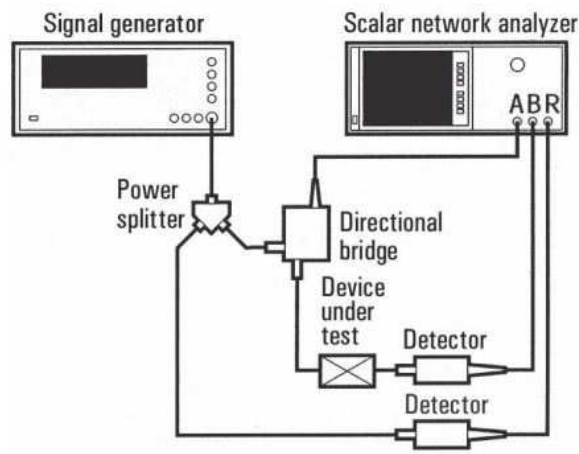
1.2 Skalární obvodový analyzátor

1.2.1 Popis obvodového analyzátoru

Skalární obvodový analyzátor je typ měřicího přístroje, který se využívá k měření velikosti parametrů v obvodů. Měří tedy pouze amplitudové (skalární) vlastnosti testovaného zařízení. SNA neuchovává informaci o fázové charakteristice zařízení, a proto nemůže sloužit k detailní a přesné simulaci testovaného zařízení. SNA je dostačujícím přístrojem pro rychlé otestování základních parametrů v obvodů, které nepotřebují znát informaci o fázi vysokofrekvenčního signálu. Mezi takové parametry patří zpětný útlum RL (Return loss) a poměr stojatých vln SWR (Standing Wave Ratio).

SNA je levnější než vektorový obvodový analyzátor, ale v dnešní době už méně používaný, protože nenabízí zcela přesnou a detailní charakteristiku měřeného zařízení. V dnešní době se už výrobci nesoustředí na vývoj skalárních obvodových analyzátorů. V současnosti se můžeme setkat s variantou, při které lze využít kombinaci spektrálního analyzátoru a přídatného tracking generátoru [1, 5, 6].

1.2.2 Realizace funkčních bloků



Obrázek 1.3: Realizace funkčních bloků SNA [7]

- **Generátor**

Generátor slouží k vytvoření vysokofrekvenčního deterministického signálu (sinusoida). RF (Radio Frequency) signál je potom veden na port testovaného zařízení. Z tohoto portu se potom stává aktivní testovací port. V minulosti byl generátor oddělen od samotného analyzátoru. V dnešní době se integruje přímo do obvodového analyzátoru. Generátory mají funkci rozmítání kmitočtu. Funkce rozmítání kmitočtu generuje vlny charakteristických parametrů (tvar, amplitudu, mezní kmitočty). Rozmítaný generátor umožňuje lineární rozmítání frekvence generovaného signálu přes celé frekvenční pásmo. RF generátory tedy dovolují měřit v širokém dynamickém rozsahu [8,9].

V rámci SNA se využívá napětím řízený oscilátor (VCO) s otevřenou smyčkou. VCO (Voltage controlled oscillator) je velmi levné, ale kmitočtově nestabilní. Frekvenční nestabilita způsobuje nepřesnost měření především u úzkopásmových zařízení (filtry) [3].

V dnešní době se používá oscilátor, který pracuje na principu přímé digitální syntézy DDS (Direct digital synthesis) [10]. Takový oscilátor je dražší, ale kmitočtově stabilní. DDS oscilátory mají větší frekvenční rozsah. Kmitočtová stabilita umožňuje generátoru generovat jednoduchou sinusoidu, přesně na uživatelem zadané frekvenci, bez velkých ztrát.

- **Rozbočovače signálu**

Při měření S-parametrů je nutné, aby obvodový analyzátor dokázal oddělit signál šířící se do DUT a signál, který se odráží od vstupního portu testovaného zařízení (měření parametru S_{11}). Tyto obvody nazýváme rozbočovače signálů. Skalární obvodový analyzátor využívá směrového můstku pro rozdělení incidentní a reflektující vlny. Dále je důležité rozbočit incidentní

vlnu kvůli srovnávání signálů. Část výkonu incidentní vlny se využije v referenčním přijímači pro porovnávání. Směrový můstek se skládá z detektoru a čtyř impedancí včetně impedance testového portu, které dohromady tvoří čtyřúhelník. Na základě vyváženosti mostu můžeme určit její směrovost D (Directivity) [11]. Více o směrovosti v části 1.3.2.

Vyvážený stav nastává tehdy, pokud všechny čtyři impedance jsou identické. Znamená to tedy, že testovací port musí být ukončen charakteristickou impedancí, která se rovná impedanci na jednotlivých větvích. Pokud toto není splněno, tak se můstek nachází v nevyváženém stavu. Napětí vyváženého stavu je rovno 0. Napětí nevyváženého stavu můstku je úměrné nesrovnalostem (odezvou) testovacího zařízení [3].

$$D \text{ (Directivity) [dB]} = \text{maximální vyváženost} - \text{minimální vyváženost} \quad (1.1)$$

Dnešní SNA používají referenční přijímače i výkonové rozbočovače. Generována přímá vlna je rozbočovačem rozdělena na dvě části. První přímá vlna se šíří dále můstkem až k DUT a druhá vlna se šíří do referenčního přijímače, který později využívá tuto vlnu pro srovnávání. Při použití výkonového rozbočovače musíme počítat s poklesem signálu minimálně o 6 dB na každé větvi rozbočovače [5].

• **Přijímač/Detektor**

Přijímač slouží k detekování a zpracování měřeného signálu. Pro detekci a demodulování v signálu se u skalárního obvodového analyzátoru používá lineárního obálkového detektoru. Obvod je složen z rezistoru a kapacitoru. Obvod má rovněž mezi svým vstupem a výstupem diodu, která usměrňuje šířící se RF vlnu. RC (resistor-capacitor) obvod slouží k filtraci signálu. Ve výsledku diodový detektor generuje stejnosměrné napětí uměrné vstupní RF vlně. Citlivost diodového přijímače je okolo -60 dBm. Dynamický rozsah se pohybuje okolo 75 dB. Dynamický rozsah se běžně u SNA navyšuje zvýšením vstupního výkonu. Širokopásmovost diodového detektoru omezuje citlivost samotného přijímače a přesnost při měření se SNA (ovlivněno především harmonickými složkami a rušivými signály). Největším problémem tohoto přijímače je především v tom, že v obvodu neuchovává informaci o fázovém posuvu vstupního signálu, a tedy tento typ přijímače není použitelný pro VNA [5].

• **Procesor/zobrazovací jednotka**

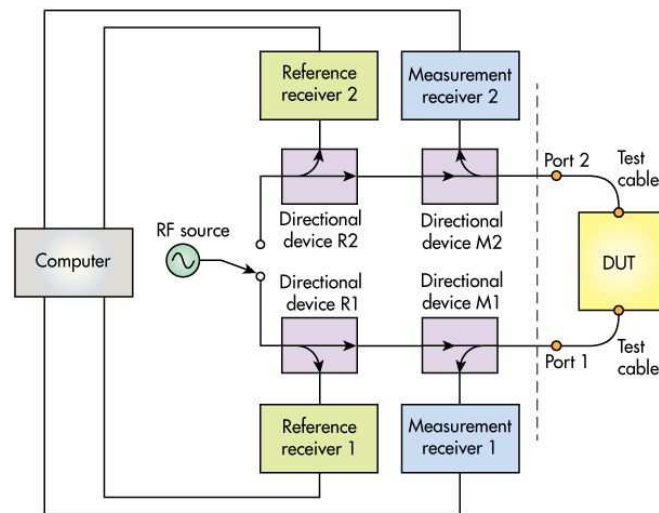
Přijímačem získané signály musí být vhodně zpracovány a interpretovány. K zobrazení měřených parametrů slouží zobrazovací jednotka, která je většinou součástí SNA. V případě levnějších modelů se využívá USB (Universal Serial Bus) portu pro propojení SNA s počítačem. Po doinstalování potřebných ovladačů a programů, které jsou součástí balení, je možné měření zobrazit na počítači. Skalární obvodové analyzátory například umožňují nastavit vstupní signál (tvar, kmitočet, lineární/logaritmické rozmítání). Můžeme dále přidat limitní čáry nebo měřící značky pro důkladnější měření.

1.3 Vektorový obvodový analyzátor

1.3.1 Popis obvodového analyzátoru

VNA je dnešním průmyslovým standardem pro testování N portových vysokofrekvenčních obvodů. Vektorový obvodový analyzátor umí měřit velikosti i fázový posuv vř parametrů. Se znalostí fázové charakteristiky můžeme tak měřit i imaginární část S parametrů. Zároveň měřením fáze získáváme mnohem širší přehled o testovaném zařízení. Největší výhodou VNA je především přesnost při měření. Tato přesnost je především závislá na správně provedené uživatelské kalibraci (vektorová korekce chyb). Více o kalibraci vektorového obvodového analyzátoru v kapitole č.3. Hlavní nevýhodou vektorového analyzátoru je především cena. V dnešní době lze zakoupit nejen klasické VNA (viz obrázek č. 1.1), ale i VNA, které je založeno na bázi softwarově definovaného rádia SDR (Software-defined radio). SDR VNA jsou především cenově přijatelnější. Na druhou stranu si uživatelé těchto zařízení musejí být vědomi určitých kompromisů, která tato zařízení mají [1].

1.3.2 Realizace funkčních bloků



Obrázek 1.4: Realizace funkčních bloků VNA se dvěma test porty [12]

- **Generátor (RF source)**

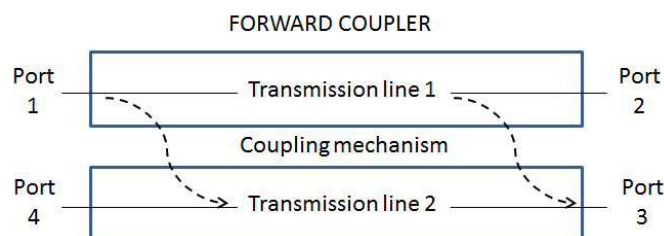
Generátor u VNA funguje na podobném principu jako u SNA (viz část 1.2.2). V praxi se používá oscilátor pracující na principu DDS, anebo řízený oscilátor s otevřenou smyčkou a zabudovaným fázovým závěsem PLL (Phase-Locked Loop). PLL slouží především k přesnějšímu měření úzkopásmových systémů a snižuje úroveň fázového šumu generovaného signálu.

U VNA je fázový závěs velmi důležitý právě kvůli celkové přesnosti měření, protože kromě velikosti parametrů v obvodu porovnáváme i fázovou charakteristiku. Mezi další důležité parametry generátoru VNA patří frekvenční stabilita a frekvenční rozsah. Frekvenční stabilita ovlivňuje přesnost samotného měření (především fáze). Frekvenční rozsah potom určuje, v jakých kmitočtech můžeme testovací zařízení měřit [13].

- **Rozbočovače signálu (Directional device)**

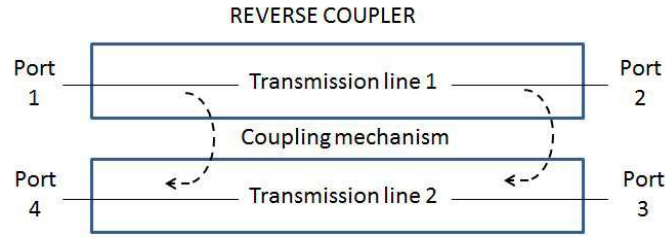
VNA využívá hned několik typů obvodů pro rozdělení signálů. Všechny vektorové obvodové analyzátory mají referenční přijímače a měřicí přijímače. Směrová odbočnice se používá pro rozdělení přímé a odražené vlny. Dále odbočnice umí směřovat daný signál do jednotlivých přijímačů. V některých analyzátoch se používá kombinace výkonového rozbočovače a směrového můstku jako u SNA (viz část 1.2.2).

Směrové odbočnice jsou lineární pasivní prvky. Obvod je realizován čtyřmi porty, dvěma přenosovými linkami a vazebním mechanismem (obrázek č.1.5 zobrazuje, jak vypadá popis směrové odbočnice pro vlnu šířící se z generátoru). V tomto případě je port 1 definován jako vstupní port. Port 2 zastupuje funkci výstupního portu. Cesta mezi portem 1 a portem 2 tvoří hlavní část přímé vlny, která se dále šíří až do DUT. Port 4 se nazývá izolovaným portem, který je impedančně přizpůsoben ($Z_4 = Z_0 = 50 \Omega$). Port 3 potom slouží jako vazební port, který pomocí vazebního mechanismu dokáže získat část přímé vlny, která se šíří vazební cestou (z portu 1 do portu 3). Vlna postupuje až k referenčnímu přijímači [11].



Obrázek 1.5: Popis rozbočovacího obvodu pro přímou vlnu [11]

Obrázek č.1.6 následně ukazuje celou situaci z pohledu odražené vlny z DUT (například při měření vstupního koeficientu odrazu S_{11}). V tomto případě je rozdíl pouze v rolích jednotlivých portů. Port 2 funguje jako vstupní port, přičemž port 1 jako výstupní. Port 3 je izolovaným portem a port 4 funguje jako vazební port. Vazební cesta nastává teď u portů 2 a 4. Musíme brát v potaz, že obrázky jsou pouze ilustrační a v rámci VNA může být jakýkoliv port vstupním portem, vazebním, izolovaným anebo výstupním. Stačí si ale uvědomit, že naproti vstupnímu portu je vždy port výstupní. Na další lince vedle vstupního portu se nachází vždy port izolovaný. A naproti tomuto portu je vždy port vazební.



Obrázek 1.6: Popis rozbočovacího obvodu pro odraženou vlnu [11]

Při použití směrových můstků nebo odbočnic musíme brát v úvahu několik parametrů, které tyto obvody charakterizují, a tak ve výsledku určují samotnou přesnost měření VNA. Prvním parametrem je vazební útlum C (coupling factor). Vypočtením vazebního útlumu můžeme například zjistit míru přímé vlny (v dB), která se využije pro srovnávání (bude se dále šířit do referenčního přijímače). Jinými slovy tak získáme informaci o poměru výkonů signálu šířící se k výstupnímu portu a signálu, který se šíří vazební cestou k vazebnímu portu.

Podle obrázku č.1.5 můžeme charakterizovat vazební útlum následujícím vztahem:

$$C \text{ (Coupling factor) [dB]} = -10 \cdot \log \frac{P_3}{P_1} \quad (1.2)$$

P_1 značí výkon vstupního portu 1 a P_3 určuje výkon na vazebním portu 3.

Dalším důležitým parametrem je izolační faktor I_f . Izolační faktor určuje míru signálu (v dB), který se vyskytuje na portu č.4. Čím je hodnota izolačního faktoru větší, tím je izolovaný port lépe izolován.

Podle obrázku č.1.5 můžeme charakterizovat izolační faktor následujícím vztahem:

$$I_f \text{ [dB]} = -10 \cdot \log \frac{P_4}{P_1} \quad (1.3)$$

P_1 značí výkon vstupního portu 1 a P_4 definuje výkon impedančně přizpůsobeného portu 4.

Dalším parametrem je směrovost D (Directivity). Směrovost určuje u odbočnic a můstků, jak dobře umí rozdělit signály, které se šíří směrem do DUT a směrem z DUT. Hodnota směrovosti závisí na izolačním faktoru, vazebním útlumu a útlumu na hlavní větvi (z portu 1 do portu 2).

$$D \text{ [dB]} = I_f - C - L_{\text{hlavní větve}} \quad (1.4)$$

Vyšší hodnota dB znamená lepší směrovost. Směrové odbočnice nabízejí velkou hodnotu směrovosti okolo 30 dB a více [9].

Dále se musejí vzít v úvahu ztráty na obou větvích odbočnice a vložený útlum samotného zařízení. Všechny zmíněné parametry ovlivňují výslednou výkonovou úroveň signálu. Pro přesné měření VNA analyzátozem je tedy nutné, aby výstupní výkonová úroveň signálu (vycházející z portu 2) byla v rozmítaném kmitočtovém pásmu konstantní [5].

- **Přijímače (Reference/Measurement receivers)**

Realizace VNA přijímače je mnohem komplikovanější, protože je nutné uchovávat informaci i o fázovém posuvu. Nelze tedy využívat diodového detektoru jako tomu bylo u SNA. V praxi se tedy používá úzkopásmový superheterodynní přijímač. Vstupní RF signál je směřovaný se signálem, který se šíří z lokálního oscilátoru. Směřováním získáme mezifrekvenční signál (signál o rozdílovém kmitočtu). Mezifrekvenční signál se vyznačuje nižším a zároveň konstantním kmitočtem. Šířka mezifrekvenčního pásma u superheterodynního přijímače je v jednotkách kHz (mnohem úzkopásmovější než diodový detektor). Takový signál se mnohem lépe filtruje a zpracovává, než kdybychom používali signál o vysokém kmitočtu. Velkou výhodou je především úzkopásmovost takového přijímače. Filtrování mezifrekvenčního signálu znatelně redukuje šum, harmonické složky a další rušivé signály. Filtrovaný signál je potom převeden analogově digitálním převodníkem na diskretní signál. Diskretní signál se dále zpracovává digitálně signálovým procesorem. Z daného signálu je potom zjištěna velikost a fáze.

Výhoda tohoto přijímače je především v redukci rušivých signálů. Mezi další výhody můžeme zařadit skvělou citlivost přijímače (okolo -110 dBm). Superheterodynní přijímač má i velký dynamický rozsah (100 dBm a více). Dynamický rozsah můžeme rozšířit, pokud navýšíme výkonovou úroveň vstupního signálu, anebo snížíme šířku mezifrekvenčního pásma. Nevýhodou je především cena. Další nevýhodou jsou systematické a náhodné chyby, které jsou způsobeny složitější realizací superheterodynního přijímače. Správnou kalibrační metodou můžeme tyto systematické chyby odstranit [5].

- **Počítač (Computer)**

Současné VNA obsahují počítač a zobrazovací jednotku pro jednoduché a rychlé zobrazení dat. Počítač využívá jako operační systém Windows 7 nebo Windows 10. Starší modely používají Windows Embedded Standard. Součástí systému je předinstalovaný program, který slouží pro nastavení a zobrazení daného měření. Procesor zpracovává a vhodně interpretuje data přímé i odražené vlny. Současně počítač získává charakteristická data z flash disku v rámci kalibrace. Na závěr potom zobrazovací jednotka zobrazí zkalibrovaný výsledek. Měřením fázové charakteristiky umožňuje VNA i rozličné zobrazení výsledného měření. Všechno co umožňuje zobrazit SNA, tak umí zobrazit i VNA (markery, limitní čáry, frekvenční rozsah a další). Současně VNA umí navíc zobrazit měření ve formě Smithova nebo polárního diagramu. VNA také dokáže zobrazit frekvenční doménu signálu na časovou doménu za použití inverzní Fourierovy transformace.

1.3.3 Softwarově definované obvodové analyzátory

- **Popis obvodového analyzátoru**

SDR VNA patří mezi vyhrazenou skupinu vektorových analyzátorů, které lze ovládat pouze pomocí dodávaného programu. Abychom odlišili klasické VNA od SDR VNA, tak se v praxi také využívá značení VNWA (Vector Network Analyser). VNWA využívají především radioamatéři a univerzity, protože pořizovací cena je oproti VNA velice nízká.

Na čelní straně VNWA jsou pouze 2 testovací porty. Analyzátor se skládá z VNWA desky, která realizuje funkční bloky analyzátoru a USB–VNWA desky plošných spojů, která slouží k připojení VNWA k počítači. VNWA nemá žádná tlačítka pro nastavení parametrů a zároveň u VNWA nenajdeme ani zobrazovací jednotku. VNWA je tedy nutné pomocí USB kabelu propojit s počítačem. Na tomto počítači musí uživatel nainstalovat dodávaný program. Bez něj nemůžeme analyzátor ovládat a provádět měření.

- **Funkcionalita obvodového analyzátoru**

SDR VNA nabízí podobnou funkcionalitu jako VNA. Dokáže měřit velikost i fázovou charakteristiku v obvodu. Oproti VNA je VNWA omezen počtem portů (maximálně 2 testovací porty). Tímto měřidlem tedy nemůžeme měřit složitější v obvodu. Pro přesné měření S-parametrů jednobranu (antén) a dvojbranu (zesilovačů, filtrů) je více než dostačující. Tak stejně jako VNA, tak i VNWA umí zobrazit frekvenční doménu signálu na časovou doménu. Pro přesnější měření lze i u VNWA využívat kalibračních metod za předpokladu, že si uživatel dokoupí speciální kalibrační sadu pro SMA (SubMiniature version A) konektor. Velkou výhodou VNWA je především univerzálnost. Kvůli použitému hardwaru a kvalitnímu softwaru lze VNWA využívat jako spektrální analyzátor nebo i LCR (Inductance, Capacitance, Resistance) měřič pro měření indukčnosti, kapacity a odporu. Mimoto VNWA dokáže změřit i zobrazit vyzařovací charakteristiku (směrovost) antény.

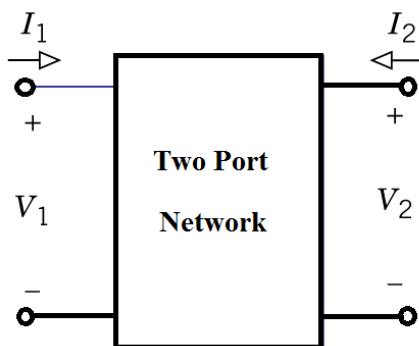
Za danou cenu představuje VNWA i několik kompromisů. Prvním z nich je nemožnost samostatně měřit s analyzátozem. Uživatel je nucen pro využití VNWA zapojit analyzátor k PC. Dalším problémem je samotný hardware. Základem je VNWA deska. V této desce se mimo jiné nachází dva DDS čipy, které fungují jako RF zdroj. Tyto čipy dovolují frekvenční rozmítání signálu pouze v rozmezí od 1 kHz až 1.3 GHz. Čipy tedy nabízejí mnohem menší frekvenční rozsah, ve kterém můžeme daný obvod měřit. Kompromisy byly provedeny i při realizaci jednotlivých přijímačů. VNWA nabízí menší dynamický rozsah. Pro vyšší kmitočty dochází i k mírným nepřesnostem při měření fázové charakteristiky vlivem levnější realizace přijímače a generátoru. Pro generovanou vlnu o frekvenci menší než 500 MHz platí, že dynamický rozsah může nabývat až 90 dB. Generovaná vlna s kmitočtem větším než 500 MHz má hodnotu dynamického rozsahu menší než 90 dB. VNWA neumožňuje v rámci jednoho měření změřit parametry přenosového koeficientu (S_{21}) a zpětného přenosového koeficientu (S_{12}). V tomto případě musí uživatel manuálně v obvodu odpojit a potom inverzně zapojit, tak aby mohl měřit i zpětný přenosový koeficient [15–18].

2 Základní měřitelné parametry

Elektrické obvody můžeme charakterizovat hned několika způsoby. V praxi se využívá především měření impedančních (Z), admitančních (Y), hybridních (H) a rozptylových parametrů (S). Z a Y parametry jsou význačné při přizpůsobování antén. Hybridní parametry především charakterizují parametry bipolárního tranzistorového zesilovače při nízkých kmitočtech. Takovým parametrem může být například zisk. Dnešní VNA dokážou měřit zařízení v rozsahu jednotek kHz až stovek GHz. Při měření RF vln lze velmi těžko charakterizovat měřený obvod pomocí Z, Y a H parametrů. Přesné měření těchto charakteristických matic není možné, protože v rámci vysokých kmitočtů nelze vytvořit ideální stav naprázdno anebo nakrátko. Důvodem je především konečná indukance a rušivá kapacitance (vysoká frekvence a jalová složka obecně). Při měření s obvodovým analyzátozem se využívá tedy rozptylových (scattering) parametrů. Za určitých předpokladů lze využívat S parametry při jakékoliv frekvenci. To je především výhodné pro měření v oblasti vysokých kmitočtů.

2.1 Z-parametry

Impedančními parametry můžeme charakterizovat obvod pouze pro frekvenci, která je menší než 300 MHz. Pro zjištění Z-parametrů je nutné, aby se obvod nacházel v ideálním stavu naprázdno. Impedanci (impedanční parametr) lze definovat jako komplexní veličinu v ohmech, která je udávána jako poměr napětí a proudu. Reálná složka charakterizuje činný odpor. Imaginární složka charakterizuje reaktanci obvodu. Pokud je imaginární složka kladná, tak reaktance nabývá indukčního charakteru. V opačném případě nabývá charakteru kapacitního. Impedanční parametry lze obecně aplikovat na zařízení s N porty. V praxi se především definují Z-parametry pro dvojbran. Využití nachází především u měření parametrů antén. Na základě Z-parametrů a jejich správné grafické interpretaci (Smithův diagram) můžeme například určit, jestli je anténa správně impedančně přizpůsobena pro daný kmitočet [19, 20]. Na obrázku č. 2.1 je zobrazen



Obrázek 2.1: Impedanční parametry dvojbranu [20]

dvojbran. Dvojbran je charakterizovaný proudem na vstupním portu (I_1), napětím na vstup-

ním portu (V_1), proudem na výstupním portu (I_2) a napětím na výstupním portu (V_2). Pokud port 2 je ve stavu naprázdno ($I_2 = 0$), tak můžeme definovat vstupní impedanci Z_{11} a přenos impedance v přímém směru Z_{21} . Pokud bude port 1 ve stavu naprázdno ($I_1 = 0$), tak lze zjistit výstupní impedanci Z_{22} a přenos impedance ve zpětném směru Z_{12} .

Parametry můžeme definovat následujícími vztahy [19]:

$$Z_{11} [\Omega] = \left(\frac{V_1}{I_1} \right) \Big|_{I_2=0} \quad Z_{21} [\Omega] = \left(\frac{V_2}{I_1} \right) \Big|_{I_2=0} \quad Z_{12} [\Omega] = \left(\frac{V_1}{I_2} \right) \Big|_{I_1=0} \quad Z_{22} [\Omega] = \left(\frac{V_2}{I_2} \right) \Big|_{I_1=0} \quad (2.1)$$

Z-parametry jsou často reprezentovány formou matice:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Impedanční parametry lze také popsat soustavou lineárních rovnic:

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ V_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.2 Y-parametry

Admitančními parametry můžeme také charakterizovat obvod pouze pro frekvenci, která je menší než 300 MHz. Pro zjištění Y-parametrů je nutné, aby jeden z portů byl zkratován (obvod ve stavu nakrátko). Admitanční parametr lze definovat jako komplexní veličinu v jednotkách siemens, která je charakterizována jako poměr proudu a napětí. Admittance je ve výsledku převrácená hodnota impedance. Zjednodušeně řečeno nám admittance popisuje zdánlivou vodivost obvodu a fázový posuv mezi napětím a proudem. Reálná složka charakterizuje reálnou elektrickou vodivost (konduktanci). Imaginární složka charakterizuje susceptanci B. Pokud je imaginární složka kladná, tak má susceptance charakter kapacitní. V opačném případě nabývá charakteru induktivního. U Z-parametrů to bylo přesně naopak. Kladné znaménko určovalo charakter induktivní a záporné zase charakter kapacitní [14].

Admitanční parametry lze obecně aplikovat na zařízení s N porty. Tak stejně jako Z-parametry, tak i Y-parametry se převážně definují pro dvojbran. Y-parametry mají hned několik využití. Můžeme je přepočítat na Z-parametry, a tak získat údaje o impedančním přizpůsobení měřeného zařízení. Dalším využitím je rozdílný náhled na obvod, který chceme impedančně přizpůsobit. Admitanční charakteristiku lze graficky interpretovat pomocí Smithova diagramu. Y-parametry mají tedy podobné využití jako Z-parametry (impedanční přizpůsobení obvodu). Oproti Z-parametrům ale získáváme odlišný pohled na daný obvod [20].

Pro definování vztahů lze použít obrázek, který jsem popisoval u impedančních parametrů (viz obrázek č. 2.1). Dvojbran je tedy charakterizovaný proudem na vstupním portu (I_1), napětím na vstupním portu (V_1), proudem na výstupním portu (I_2) a napětím na výstupním portu (V_2). Pokud port 2 je zkratován ($V_2 = 0$), tak můžeme definovat vstupní admitanci Y_{11} a přenos admitance v přímém směru Y_{21} . Pokud zkratujeme port 1 ($V_1 = 0$), tak lze zjistit výstupní admitanci Y_{22} a přenos admitance ve zpětném směru Y_{12} .

Admitanční parametry dvojbranu lze definovat následovně [19]:

$$Y_{11} [S] = \left(\frac{I_1}{V_1} \right) \Big|_{V_2=0} \quad Y_{21} [S] = \left(\frac{I_2}{V_1} \right) \Big|_{V_2=0} \quad Y_{12} [S] = \left(\frac{I_1}{V_2} \right) \Big|_{V_1=0} \quad Y_{22} [S] = \left(\frac{I_2}{V_2} \right) \Big|_{V_1=0} \quad (2.4)$$

Reprezentace Y-parametrů pomocí matice (inverzní matice k impedanční matici):

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Admitanční parametry můžeme popsat soustavou lineárních rovnic:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \\ I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

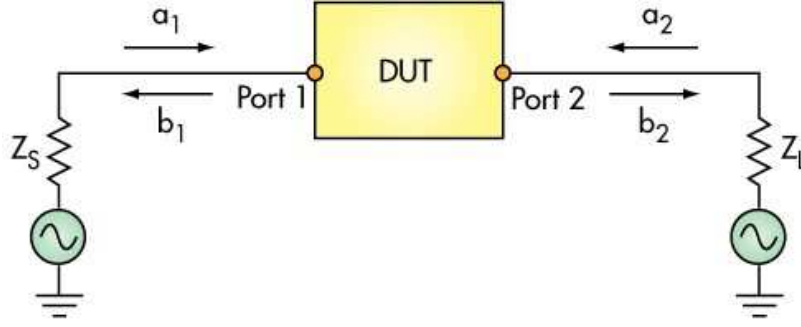
2.3 S-parametry

Rozptylové parametry se používají při charakterizaci vf obvodů. S-parametry nemají jednotku a jsou vyjádřeny komplexními čísly. Na základě znalosti S parametrů lze vypočítat charakteristické parametry vf obvodu (zpětný útlum, SWR, zisk, vstupní impedance a další). Charakterizace elektrického obvodu probíhá na základě přímých a odražených vln. Na obrázku č.2.2 lze vidět zapojený dvojbran. Do každého portu může být přivedena generovaná vlna z generátoru (značení zdroje u každého portu). Z_S a Z_L značí impedanci na jednotlivých portech. Předpokládejme, že jednotlivé porty mají charakteristickou impedanci $Z_S = Z_L = 50 \Omega$. Na signál v prvním portu lze nahlížet jako na superpozici dvou vln, které se šíří opačnými směry [21]. Veličina a_1 značí přímou vlnu na portu 1 a b_1 určuje odraženou vlnu z portu 1. Pro druhý port platí to stejné. Veličina a_2 určuje přímou vlnu na portu 2 a b_2 definuje odraženou vlnu z portu 2 [1,12].

Přímé napětové vlny pro N portů jsou charakterizovány následujícím vztahem [13]:

$$a_n = \frac{V_{0n}^+}{\sqrt{Z_{0n}}} \quad (2.7)$$

V_{0n}^+ určuje napětí vlny, která přichází do daného portu a Z_{0n} znázorňuje charakteristickou impedanci.



Obrázek 2.2: Rozptylové parametry dvojbranu [12]

Odražené napěťové vlny pro N portů jsou charakterizovány následujícím vztahem [13]:

$$b_n = \frac{V_{0n}^-}{\sqrt{Z_{0n}}} \quad (2.8)$$

V_{0n}^- určuje napětí vlny, která se odráží do daného portu a Z_{0n} znázorňuje charakteristickou impedanci.

S-parametry jsou definovány jako poměry těchto vln. S-parametry zapisujeme formou S_{ij} , přičemž i určuje cílový port a j značí zdrojový port (brána, kterou prochází generovaný signál). Pokud port 2 korektně zakončíme ($Z_L = Z_0$), tak se vedením bude šířit pouze postupná vlna (bez odrazů). V tomto případě platí, že $a_2 = 0$. Můžeme tedy určit hodnotu vstupního koeficientu odrazu (S_{11}) a přenosového koeficientu při impedančně přizpůsobeném výstupu (S_{21}). Inverzním způsobem (korektně zakončeným prvním portem) můžeme získat výstupní koeficient odrazu (S_{22}) a zpětný přenosový koeficient (S_{12}).

Význam jednotlivých parametrů:

- S_{11} je význačný především pro měření antén. Tímto parametrem lze zjistit SWR, vstupní impedanci zařízení, zpětný útlum na vstupním portu a činitel odrazu.
- S_{21} můžeme zjistit především vložný útlum nebo zisk signálu při průchodu testovaným zařízením.
- S_{12} slouží pro výpočet zisku signálu, který se šíří z výstupu do vstupu zařízení.
- S_{22} se využívá na výpočet SWR, výstupní impedanci a zpětný útlum pro výstupní port.

S-parametry dvojbranu můžeme charakterizovat následujícími vztahy [14]:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2.9)$$

S-parametry jsou často reprezentovány formou matice:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Rozptylové parametry dvojbranu lze také popsat soustavou lineárních rovnic:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Maticový zápis pro obvod s N porty:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Matice S-parametrů je vždy symetrická. Velikost této matice (počet S-parametrů) závisí na počtu portů testovaného obvodu.

2.4 Odvozené parametry u dvojbranu

Odvozené parametry jsou takové parametry, které vyjadřujeme z naměřených S-parametrů. Tyto parametry přímo charakterizují vlastnosti v obvodu při daném kmitočtu. Všechny tyto přepočty zpracovává VNA automaticky.

2.4.1 Činitel odrazu

Činitel odrazu Γ představuje parametr, kterým lze dále charakterizovat impedanční přizpůsobení obvodu. Jedná se o poměrový, komplexní parametr definovaný jako podíl odražené a přímé vlny. Parametr má souvislost s dalšími parametry, popisující impedanční přizpůsobení obvodu. Mezi takové parametry patří například VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), zpětný útlum (RL) a vstupní impedance obvodu. V případě dvojbranu je nutné rozlišovat parametry vstupního (port 1) a výstupního portu (port 2) [9, 21].

$$\begin{aligned} \Gamma_{in} &= \frac{b_1}{a_1} = S_{11} \\ \Gamma_{out} &= \frac{b_2}{a_2} = S_{22} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Přičemž platí, že $0 \leq |\Gamma| \leq 1$. Pokud je $|\Gamma| = 0$, tak je obvod ideálně impedančně přizpůsoben (nenastávají odrazy). Naopak $|\Gamma| = 1$ vyjadřuje totální odraz (na otevřeném nebo zkratovém konci).

Činitel odrazu můžeme vyjádřit i logaritmicky:

$$\begin{aligned} RL_{in} [dB] &= 20 \cdot \log|\Gamma_{in}| \\ RL_{out} [dB] &= 20 \cdot \log|\Gamma_{out}| \end{aligned} \quad (2.14)$$

V takovém případě lze získat informaci o zpětném útlumu. Zpětný útlum určuje míru ztráty úrovně signálu vlivem impedančního nepřizpůsobení. V praxi musí být hodnota RL co největší (ideálně $RL = \infty$) tak, aby se vlna neodrážela od testovaného obvodu zpět ke svému zdroji.

Dalším význačným parametrem, který souvisí s Γ a RL , je napěťový poměr stojatých vln (VSWR). VSWR je bezrozměrná veličina. Na základě VSWR lze určit, jestli náš testovaný obvod je správně impedančně přizpůsoben. Impedanční přizpůsobení určuje, jestli nedochází na vstupu testovaného zařízení k odrazům. Výsledkem jsou potom částečné ztráty energie přímé vlny. Odražená vlna se šíří směrem ke zdroji a dochází ke skládání přímé a odražené vlny. Získáme tak stojatou vlnu, která nepřenáší žádnou energii (nežádoucí stav).

VSWR definujeme pomocí Γ následovně [21]:

$$\begin{aligned} VSWR_{in} &= \frac{1 + |\Gamma_{in}|}{1 - |\Gamma_{in}|} \\ VSWR_{out} &= \frac{1 + |\Gamma_{out}|}{1 - |\Gamma_{out}|} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Hodnoty VSWR patří do intervalu $1 \leq VSWR \leq \infty$. Pokud je $VSWR = 1$, tak je obvod ideálně impedančně přizpůsoben (nenastávají odrazy). Naopak $VSWR = \infty$ značí totální odraz (na otevřeném nebo zkratovém konci).

Pro grafické zobrazení impedančního přizpůsobení (například Smithův diagram) musíme znát vstupní impedanci testovaného zařízení. Vstupní impedance je zapsána jako komplexní číslo (v ohmech). Reálná část určuje činný odpor v ohmech (Ω). Imaginární část definuje typ reaktance. Pokud je imaginární část záporná, tak se jedná o reaktanci kapacitní. Kladná imaginární část značí reaktanci induktivní. Pokud známe Γ a charakteristickou impedanci Z_0 (v praxi 50Ω nebo 75Ω), tak můžeme spočítat vstupní impedanci zařízení následujícím vztahem:

$$\begin{aligned} Z_{in} [\Omega] &= Z_0 \left(\frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} \right) \\ Z_{out} [\Omega] &= Z_0 \left(\frac{1 + \Gamma_{out}}{1 - \Gamma_{out}} \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.4.2 Činitel přenosu

Činitel přenosu τ charakterizuje přenosové vlastnosti použitého zařízení. Generovaná vlna se šíří DUT a na základě naměřených charakteristik této vlny, po výstupu z DUT, se určí vlastnosti přenosu testovaného zařízení. Činitel přenosu nám umožňuje zkoumat zisk, vstupní útlum a skupinové zpoždění. Podle použitých portů a směru šíření signálu můžeme definovat přímé (*thr*) a opačné (*rev*) parametry. Některé parametry v rámci měření lze definovat skalárně i vektorově. To především platí pro určení zisku zařízení [3].

Činitel přenosu můžeme definovat jako podíl vlny, která se šíří do vstupního portu a vlny, která je za DUT.

$$\begin{aligned}\tau_{thr} &= \frac{b_2}{a_1} = S_{21} \\ \tau_{rev} &= \frac{b_1}{a_2} = S_{12}\end{aligned}\tag{2.17}$$

Zisk (G) je parametr, který nás především zajímá při měření antén, tranzistorů a zesilovačů. Zisk nám definuje míru, o jakou se zvýšila výkonová úroveň signálu šířící se z jednoho portu do druhého portu DUT (tranzistoru, zesilovače). Při měření zisku antény je nutné naměřenou výkonovou úroveň signálu neznámé antény porovnat s hodnotou použité referenční antény (substituční metoda). Následující vztahy pro výpočet zisku platí pro měření zisku tranzistorů a zesilovačů obecně.

$$\begin{aligned}G_{thr} [dB] &= 20 \cdot \log|\tau_{thr}| \\ G_{rev} [dB] &= 20 \cdot \log|\tau_{rev}|\end{aligned}\tag{2.18}$$

Opakem zisku je potom vložný útlum (L), který lze také definovat pomocí velikosti činitele přenosu.

$$\begin{aligned}L_{thr} [dB] &= -20 \cdot \log|\tau_{thr}| \\ L_{rev} [dB] &= -20 \cdot \log|\tau_{rev}|\end{aligned}\tag{2.19}$$

VNA dokáže měřit i fázovou charakteristiku vysokofrekvenčního obvodu. Skupinovým zpožděním (group delay) [3] dokážeme zjistit průběh fáze (fázové zkreslení) při přenosu signálu testovaným zařízením. „Skupinové zpoždění je doba vyjadřující skutečné zpoždění jednotlivých frekvenčních složek signálu při jeho průchodu daným zařízením. Pro kvalitní přenos je nutné, aby tato charakteristika byla v pásmu přenášených frekvencí téměř konstantní" [22]. Matematicky můžeme skupinové zpoždění vyjádřit jako zápornou derivaci fáze ϕ , která je derivována podle úhlového kmitočtu ω (rovnice č.2.20).

$$g = \frac{-d\phi}{d\omega}\tag{2.20}$$

3 Kalibrace obvodového analyzátoru

Vektorový obvodový analyzátor umožňuje přesné měření vř obvodů. Přesnost a opakovatelnost měření se odvíjí na základě kalibrace VNA. V praxi se lze setkat s dvěma typy kalibrací:

1. Tovární kalibrace
2. Uživatelská kalibrace

Tovární kalibrace je provedena výrobcem. Tovární kalibrace poskytuje kalibraci na úrovni testovacích portů. Znamená to tedy, že referenční rovina (viz kapitola č.3.2.1) je posunuta ke konektorům testovacích portů analyzátoru. To uživateli zajišťuje, že vstupní a výstupní signály (jejich výkonové úrovně), které se šíří jednotlivými testovacími porty, budou přesně reprezentovány. Továrně kalibrován je vektorový i skalární obvodový analyzátor.

Uživatelská kalibrace je kalibrace, která je proveditelná pouze na VNA. Na základě definovaných standardů a metod dokáže analyzátor matematicky odstranit systematické chyby (viz kapitola č.3.1.1). Uživatelská kalibrace nám umožňuje posunout referenční rovinu blíže k DUT tak, abychom mohli analyzátozem nezkresleně změřit parametry DUT bez dalších vložných ztrát (redukce, spojky). Uživatelská kalibrace je pouze možná u VNA, jelikož VNA umožňuje měřit velikost i fázi jednotlivých rozptylových parametrů. Skalární obvodový analyzátor nelze tedy kalibrovat uživatelskou kalibrací, protože při měření rozptylových parametrů nezaznamenává fázi. V následujících částech se budeme zabývat především uživatelskou kalibrací [1].

3.1 Chyby měření

Vektorový obvodový analyzátor je univerzální zařízení pro měření S parametrů. Dokáže měřit velmi přesně všechny typy vř zařízení při různých kmitočtech. VNA je univerzální zařízení, ale rozhodně není perfektní. VNA má velmi složitou architekturu. Architektura VNA se skládá hned z několika složitých obvodů (viz kapitola č.1.3.2). Tyto obvody vnášejí chybu do samotného měření. Chyba měření souvisí s odchylkou námi změřených hodnot od hodnot skutečných.

Chyby měření můžeme rozdělit hned do tří kategorií:

1. Systematické chyby
2. Náhodné chyby
3. Drift chyby

Společně tyto druhy chyb popisují přesnost měření vektorovým obvodovým analyzátozem.

3.1.1 Systematické chyby

Součástí systematických (soustavných) chyb jsou takové chyby, které jsou reprodukovatelné a můžeme je tedy matematicky charakterizovat. **Systematické chyby charakterizujeme pomocí chybových koeficientů (viz kapitola č.3.2)**. Soustavné chyby souvisejí především s nedokonalou realizací funkčních bloků vektorového obvodového analyzátoru. Systematické chyby jsou dále tvořeny vložnými ztrátami a nedokonalostmi připojených kabelů a redukci. Dále zde můžeme zařadit impedanční nepřizpůsobenost testovacích portů, konečnou směrovost odbočnic, odchylky v rámci výstupního výkonu a nedokonalosti přijímačů (rozdílné frekvenční odezvy podél frekvenčního pásma analyzátoru). Všechny tyto chyby lze matematicky charakterizovat a uživatelskou kalibrací odstranit.

Kalibrace systematických chyb (charakterizace a výpočet chybových koeficientů) není zcela perfektní. Záleží na použitých standardech, kabelech, konektorech, metodách a zkušenostech uživatele.

3.1.2 Náhodné chyby

Náhodné chyby souvisí s elektronickým šumem, který je generován analyzátozem a testovací sestavou. Tyto chyby nelze matematicky charakterizovat pomocí chybových koeficientů, protože jsou časově variabilní. Náhodné chyby jsou přítomné i po provedení uživatelské kalibrace. Omezení výskytu náhodných chyb má hlavní vliv na přesné měření vektorovým obvodovým analyzátozem, protože ostatní typy chyb můžeme uživatelskou kalibrací odstranit. Cílem je především dosáhnout stavu termodynamické rovnováhy.

Následujícími způsoby lze omezit výskyt náhodných chyb:

1. Použití kvalitních kabelů a konektorů
2. Pravidelné čištění konektorů isopropylalkoholem
3. Utahování spojů pomocí vhodného momentového klíče
4. Využití funkce analyzátoru - průměrování měřených hodnot
5. Snížení nastavené hodnoty mezifrekvenčního pásma

3.1.3 Drift chyby

Mezi drift chyby můžeme zařadit především okolní vlivy, které se mění v čase po provedené kalibraci. V čase se může například změnit teplota okolního prostředí anebo vlhkost vzduchu. Obecně drift chyby vyjadřují změnu pracovní teploty v analyzátozu a celé testovací sestavě. Drift chyby lze kalibrací odstranit. Analyzátor tak umí vzít v potaz podmínky, za kterých je měření

prováděno. Pokud se například teplota v analyzátoru prudce změní po kalibrováním stavu, tak je nutné přístroj znovu kalibrovat [23].

3.2 Chybový model vektorového obvodového analyzátoru

Vektorový obvodový analyzátor se skládá hned z několika funkčních bloků. Realizace těchto bloků není však ideální. Tyto nedostatky lze zařadit mezi systematické chyby. Soustavné chyby můžeme matematicky charakterizovat. Chybový model a pole chybových koeficientů nám umožňují provést tuto charakterizaci. Na základě této charakterizace lze potom nastavit referenční rovinu blíže k DUT.

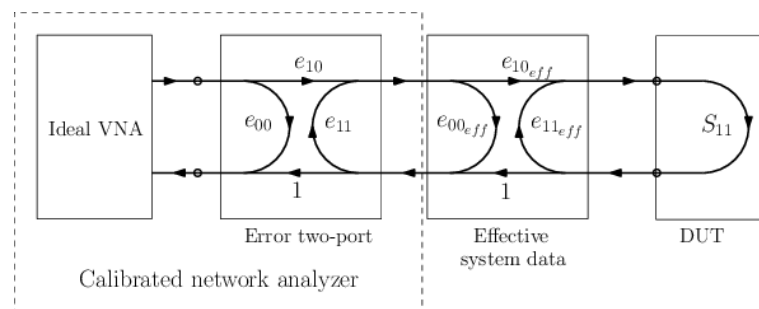
Ideálně kalibrovaný obvod má následující vlastnosti:

1. Charakteristická impedance obvodu má pouze reálnou složku.
2. Nulový fázový posuv
3. Velikost činitele odrazu $|\Gamma| = 0$

Na základě uvedených parametrů lze ideálně kalibrovaným obvodem efektivně šířit energii elektromagnetických vln (bezztrátový obvod). To nám ve výsledku umožní změřit parametry (ztráty) způsobené pouze testovacím zařízením.

3.2.1 Popis chybového modelu

Na základě znalosti chybových koeficientů můžeme provést uživatelskou kalibraci. Ideální model VNA (na obrázku č.3.1 jako **Ideal VNA**) popisuje dokonalou realizaci funkčních bloků VNA (v praxi není možné). Oproti tomu chybový model (na obrázku č.3.1 označen jako **Error two-port**) matematicky charakterizuje nedokonalosti funkčních bloků VNA.



Obrázek 3.1: Chybový model pro měření parametru S_{11} [24]

Chybový model (viz obrázek č.3.1) popisuje tři základní chybové koeficienty (e_{00} , e_{10} , e_{11}), které lze uživatelskou kalibrací odstranit při měření parametru S_{11} . Obrázek je nutné vzít pouze jako ilustraci. Pro měření různých rozptylových parametrů se využívá odlišných chybových modelů.

Dále každá kalibrační metoda definuje počet chybových koeficientů, které dokáže matematicky charakterizovat.

Ve většině případů se využívá chybových modelů, které mají 3, 5, 7, 12, 15 nebo 16 chybových koeficientů. Každý chybový koeficient matematicky charakterizuje určitou chybu v realizaci funkčního bloku. Z toho tedy vyplývá, že při měření dvouportových rozptylových parametrů bude nutné charakterizovat více chybových koeficientů než u jednoportových měření.

Základní systematické chyby (při měření parametrů S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}) [25]:

1. **Source Match error** je chyba, která je způsobena impedančně nepřizpůsobeným vstupním portem. Popisuje tak zpětný útlum vstupního portu. Projevuje se odrazem odražené napěťové vlny b_1 (viz obrázek č.2.2) od portu 1 zpět do DUT. Na obrázku č.3.1 je tato chyba charakterizována koeficientem e_{11} .
2. **Reflection Tracking error** je způsoben rozdílnou frekvenční odezvou mezi přijímači vstupního portu při měření parametru S_{11} a S_{22} . Na obrázku č.3.1 je tato chyba charakterizována parametrem e_{10} a odraženou vlnou 1.
3. **Directivity error** je chyba, která souvisí s konečnou směrovností odbočnic. Konečná směrovnost způsobuje, že incidentní napěťová vlna a_1 a šum bude vlivem směrové odbočnice přijat měřeným kanálem (přijímačem). Důsledkem konečné směrovnosti je potom interference odražené vlny b_1 , incidentní vlny a_1 a šumu v přijímači analyzátoru. Tenhle případ souvisí s měřením parametru S_{11} . Velmi podobné je to i při měření parametrů S_{12} , S_{21} , S_{22} . Na obrázku č.3.1 je tato chyba charakterizována koeficientem e_{00} .

Další chyby které je nutné charakterizovat (při měření parametrů S_{12} , S_{21}) [25]:

1. **Load Match error** je chyba podobná chybě **Source Match**, ale projevuje se na výstupním portu. Popisuje tedy zpětný útlum výstupního portu.
2. **Transmission Tracking error** je chyba, která je způsobena rozdílnou frekvenční odezvou mezi referenčním kanálem vstupního portu a měřeným kanálem výstupního portu.
3. **Isolation error** je typ chyby, která souvisí s termodynamickou nerovnováhou VNA a přeslechem mezi vstupním a výstupním portem. Dnešní VNA jsou natolik efektivní, že ve většině uživatelských kalibrací nemusíme **Isolation** chybu vůbec řešit.

Důsledkem uživatelské kalibrace je posunutí referenční roviny směrem k DUT. **Referenční rovinu můžeme tedy definovat jako fyzické rozhraní mezi chybovým modelem a testovacím zařízením.** Referenční rovina nám umožňuje měřit pouze DUT. Nemusíme tedy brát v potaz útlumy připojených kabelů a redukci.

3.2.2 Surová a efektivní systémová data

Pole chybových koeficientů můžeme reprezentovat formou surových anebo efektivních systémových dat. Surová systémová data popisují chybové koeficienty a realizaci funkčních VNA bloků před kalibrací. Efektivní systémová data (na obrázku č.3.1 jako **Effective system data**) potom interpretují chybové koeficienty po provedené kalibraci. Takové koeficienty nazýváme efektivními chybovými koeficienty. Efektivní chybové koeficienty (na obrázku č.3.1 parametry $e_{00_{eff}}$, $e_{10_{eff}}$, $e_{11_{eff}}$) potom vyjadřují zbývající chybovost, která nešla odstranit uživatelskou kalibrací. Popisují tedy úspěšnost provedené kalibrace [26].

3.3 Kalibrační standardy

Kalibrační standard je speciální jednoportové nebo dvouportové fyzické zařízení (obecně elektrický obvod), u kterého jsou známy parametry v závislosti na kmitočtu. Mezi tyto parametry můžeme například zařadit amplitudu, fázový posuv, činitel přenosu, činitel odrazu, elektrickou délku, charakteristickou impedanci. Kalibrační standardy můžeme dělit na základě typu přenosového média anebo na základě znalosti jednotlivých parametrů používaného standardu.

Dělení kalibračních standardů podle typu přenosového média:

1. Kalibrační standardy pro koaxiální vedení (nejběžnější)
2. Kalibrační standardy pro vlnovody s obdélníkovým průřezem
3. Kalibrační standardy pro mikropáskové vedení

VNA je univerzální zařízení. V rámci měření tedy nemusíme používat pouze koaxiální kabely.

Dělení podle znalosti parametrů elektrického obvodu používaného standardu:

1. Kalibrační standardy zcela charakterizované
2. Kalibrační standardy částečně charakterizované

3.3.1 Zcela charakterizované kalibrační standardy

Všechny potřebné parametry elektrického obvodu jsou zcela charakterizovány. Na základě zjištěných parametrů definuje VNA chybové koeficienty. Jelikož je realizace zcela charakterizovaného kalibračního standardu pro vysoké kmitočty (obecně pro velký kmitočtový rozsah) složitá, tak je nutné porovnat naměřené hodnoty standardu s charakterizovanými daty na daném kmitočtu. Všechny následující kalibrační standardy mají elektrickou délku rovnou 0 mm (vyjma standardu **Offset Short**). Pokud délka není rovna 0 mm, tak je nutné elektrickou délku přesně znát.

- **Open**

Jednoportový kalibrační standard, který je konstruován jako spojení naprázdno. Ideální spojení naprázdno je charakterizováno nekonečným odporem. Velikost činitele odrazu $|\Gamma| = 1$. Na vysokých kmitočtech je nutné porovnat měření s charakteristickými daty standardu, jelikož na otevřeném konci elektrického obvodu se objevuje rušivá kapacitance.

- **Short**

Standard **Short** definujeme jako stav nakrátko. Patří mezi jednoportové standardy. Ideální spojení nakrátko můžeme charakterizovat nulovým odporem. Dále velikost činitele odrazu takového obvodu je $|\Gamma| = 1$. Především na vysokých kmitočtech je v elektrickém obvodu přítomna nezanedbatelná induktance.

- **Offset Short**

Rozšiřuje **Short** standard o přidanou elektrickou délku. Využívá se především jako kalibrační standard pro vlnovody s obdélníkovým průřezem.

- **Match, Load**

Standardy **Match** a **Load** definují impedančně přizpůsobený obvod. Impedance obvodu je rovna referenční impedanci (charakteristická impedance použitých konektorů nebo systémová impedance). Velikost činitele odrazu $|\Gamma| = 0$. V rámci vyšších kmitočtů (nad 8 GHz) je standard **Match** nepřesný.

- **Sliding Match, Sliding Load**

Následující standardy se používají v kombinaci se standardem **Match** pro přesnější kalibraci v rámci celého kmitočtového rozsahu. Pro nižší frekvence (méně než 2 GHz) se využívá standardu **Match**. Pro vyšší frekvence se využívá standard **Sliding Match**. Tento standard je přesnější a lépe realizovatelný. Standard **Sliding Match** je tvořen především značenými pozicemi, dlouhým vedením a zátěží. Musí platit, že $|\Gamma_{\text{vedení}}| = 0$ a $|\Gamma_{\text{zátěž}}| \neq \infty$. Konečnou odrazivost zátěže lze matematicky odstranit. Zátěž lze přesouvat a měřit v definovaných pozicích. Na základě provedených měření, v různých pozicích, můžeme například pomocí Smithova diagramu definovat impedančně přizpůsobený obvod ($|\Gamma_{\text{zátěž}}| = 0$) na daném kmitočtovém rozsahu. Více naměřených rozličných pozic umožňuje přesnější určení impedančně přizpůsobeného obvodu [27].

- **Through**

Dvouportový standard který se využívá pro propojení testovacích portů. Ideální standard **Through** je bezetrátový. Ve skutečnosti je však potřeba znát vložný útlum standardu na daném kmitočtu. **Používá se při kalibraci elektrického obvodu, který je tvořen dvěma konektory stejného typu.**

3.3.2 Částečně charakterizované kalibrační standardy

Částečně charakterizované kalibrační standardy využívají funkce dané kalibrační metody. V praxi tedy není nutné naměřit všechny parametry elektrického obvodu standardu v daném kmitočtovém rozsahu, ale stačí splnit několik nezbytných podmínek proto, aby kalibrační metoda dokázala určit chybové koeficienty. Vlastnosti následujících standardů jsou v praxi lépe realizovatelné bohužel za cenu používání odlišných kalibračních metod.

- **Reflect**

Jednoportový standard který je charakterizován především velikostí činitele odrazu a fázovým posuvem. Pro tento kalibrační standard platí podmínka $|\Gamma| > 0$). Fázi lze přibližně definovat.

- **Unknown Through**

Dvouportový obvod který používáme, pokud neznáme přesné parametry kalibračního standardu **Through**. Jako standard **Unknown Through** lze použít jakýkoliv dvouportový elektrický obvod, který splňuje podmínku $S_{21} = S_{12}$. Dále je nutné znát přibližnou hodnotu fázového posuvu. Nevýhodou při použití tohoto standardu je především určitá ztráta přesnosti při kalibrování analyzátoru.

- **Symmetrical Network**

Dvouportový obvod který musí splňovat podmínku $S_{11} = S_{22}$ (symetričnost). Velikost a fáze činitele odrazu musí být stejná na obou portech.

- **Line**

Dvouportový standard který je definován minimálním vložným útlumem a nenulovou elektrickou délkou. Geometrická délka standardu **Line** závisí především na používaném kmitočtovém rozmezí a standardu **Through**, který se často souběžně využívá se standardem **Line** v rámci několika kalibračních metod. Při kalibraci lze využít standardy **Line** různé délky v závislosti na kmitočtu, **Through** standardu a použité kalibrační metodě. Standard **Line** splňuje podmínky $S_{21} = S_{12}$ a $S_{11} = S_{22} \approx 0$. Z těchto podmínek vyplývá symetričnost **Line** standardu. Dále je tento standard impedančně přizpůsobený k charakteristické impedanci použitých konektorů nebo k charakteristické impedanci systému [23, 26].

- **Attenuation**

Dvouportový standard u kterého stačí znát pouze přibližnou hodnotu vložného útlumu, ale musí splňovat následující podmínky $|\Gamma_{port1}| \approx 0$ a $|\Gamma_{port2}| \approx 0$. Z toho vyplývá, že standard tedy musí být impedančně přizpůsobený k referenční impedanci na obou portech.

3.4 Kalibrační metody

Kalibrační metody umožňují na základě použitých standardů definovat chybový model VNA a vypočítat chybové koeficienty. Ve výsledku tak dokážeme odstranit systematické chyby VNA.

Pro výběr správné kalibrační metody je nutné posoudit jejich vlastnosti a možnosti použití. Výběr kalibrační metody provádíme na základě:

- rozptylového parametru, který chceme měřit.
- rychlosti provedené kalibrace (počet kalibračních standardů a jejich připojení a odpojení)
- počtu charakterizovatelných chybových koeficientů (neboli jaké chyby můžeme kalibrační metodou odstranit). S počtem charakterizovatelných chybových koeficientů souvisí přesnost kalibrační metody.
- typu přenosového média (koaxiální vedení, mikropáskové vedení, vlnovody s obdélníkovým průřezem)
- používaného kmitočtového rozsahu
- použitých kalibračních standardů

Kalibrační metody dělíme podle počtu kalibrovaných portů a podle charakterizace chybových koeficientů. Někdy je možné se i setkat s dělením kalibračních metod podle počtu charakterizovaných chybových koeficientů.

Dělení kalibračních metod podle kalibrovaných portů:

1. **Jednoportové kalibrační metody** – měření parametru S_{11} nebo S_{22}
2. **Jednocestné kalibrační metody** – měření parametrů S_{11} , S_{21} nebo S_{22} , S_{12}
3. **Dvouportové kalibrační metody** – měření parametrů S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}

Kalibrační metody lze obecně definovat i pro N portové obvody. Nejsou tedy omezeny pouze na dva porty. V praxi se ale hlavně využívají dvouportové VNA. Především závisí na uživateli, jaký typ kalibrační metody si vybere. Dvouportové kalibrační metody nabízí možnost měřit všechny rozptylové parametry na daném kmitočtovém rozmezí. Nevýhodou je potom časová náročnost celé kalibrace (nutnost charakterizovat více chybových koeficientů, jak v přímém tak v opačném směru). Dále je důležitá samotná přesnost, a tedy i způsob charakterizace chybových koeficientů.

Dělení kalibračních metod podle způsobu charakterizace:

1. **Definující kalibrační metody.** Tyto kalibrační metody vycházejí z předpokladu, že všechny použité kalibrační standardy jsou jasně charakterizovány. Mezi tyto kalibrační standardy patří **Short, Open, Through, Match (Load), Offset Short, Sliding Match (Sliding Load)**.

2. **Samokalibrační metody.** Tyto metody využívají kalibrační standardy, které jsou pouze částečně charakterizovány. Mezi samokalibrační metody patří takové metody, u kterých je nutno alespoň jednou použít standard **Reflect, Unknown Through, Symmetrical Network, Line, Attenuation**.

Z těchto dělení vyplývá, že v praxi se využívá velké množství kalibračních metod (velké množství kalibračních standardů). Závisí tedy na používané kalibrační sadě. **Vlastnosti kalibračních metod tedy vychází z použitých kalibračních standardů (viz kapitola č.3.3).**

3.4.1 Jednoportové kalibrační metody

- **Refl Open**

Kalibrační metoda, která umí určit pouze chybový koeficient chyby **Reflection Tracking**. Využívá k tomu pouze jedno připojení standardu **Open**. V praxi se nepoužívá kvůli své nepřesnosti (nelze matematicky definovat **Source Match error** a **Directivity error**).

- **Refl Short**

Je ekvivalentní kalibrační metodě **Refl Open** za použití standardu **Short**. Kvůli své nepřesnosti se v praxi nepoužívá (nelze charakterizovat chybové koeficienty pro chyby **Source Match** a **Directivity error**).

- **OSM (Open-Short-Match), OSL (Open-Short-Load)**

V praxi nejpožívanější kalibrační metoda pro měření jednoportových rozptylových parametrů. Při použití této kalibrační techniky je nutné získat parametry z kalibračních standardů **Open, Short, Match (nebo Sliding Match)**. Kalibrační metoda definuje tři chybové koeficienty. Standard **Open a Short** definují **Reflection Tracking error** a **Source Match error**. Standard **Match** definuje **Directivity error**. Slouží tedy k přesné jednoportové kalibraci i pro vysoké kmitočty.

3.4.2 Jednocestné kalibrační metody

- **OSMT (Open-Short-Match-Through)**

Kalibrační technika **OSMT** využívá kalibraci **OSM** na jednom portu a kalibrační standard **Through** na propojení vstupního a výstupního portu. Na základě této techniky je možné měřit parametry pouze v jediném směru. Tato metoda se v praxi moc nevyužívá, protože nedosahuje dostatečné přesnosti při kalibrování přenosových parametrů. Standard **Open a Short** definují chybové koeficienty pro **Source Match error** a **Reflection tracking error** vstupního portu. Pomocí standardu **Match** získáme informaci o **Directivity error** vstupního portu. Standard **Through** potom definuje **Transmission Tracking error**. Bohužel tato metoda nedefinuje chybové koeficienty pro **Load Match error** a **Isolation error**.

3.4.3 Dvouportové kalibrační metody

- **Trans Through**

Jediná dvouportová kalibrační metoda, která neumí kalibrovat analyzátor pro měření parametrů S_{11} a S_{22} . Lze ji tedy použít pouze při měření přenosových charakteristik v obvodu. Pro použití stačí připojit pouze standard **Through**. Tento standard definuje pouze chybové koeficienty chyby **Transmission tracking**. Tato metoda není tedy moc přesná a v praxi využitelná.

- **TOM (Through-Open-Match)**

Kalibrační metoda která k charakterizaci chybových koeficientů využívá standardy **Through**, **Open** a **Match**. Všechny tyto standardy musí být zcela charakterizované. Tato kalibrační metoda definuje 7 chybových koeficientů. Matematicky dokáže charakterizovat **Reflection tracking error**, **Source Match error**, **Directivity error**, **Load Match error**, **Transmission tracking error**. Metoda je velmi přesná pro nižší kmitočty (do 8 GHz). Pro tuto metodu použijte kalibrační standardy **Open**, **Match** na oba porty. Pro propojení testovacích portů použijte standard **Through**. Tato kalibrační metoda umožňuje automaticky detekovat chyby, které jsou způsobeny opotřebovanými standardy.

- **TOM-X (Through-Open-Match-Crosstalk)**

Jedná se o rozšíření kalibrační metody **TOM**, která umožňuje vzít v potaz i přeslechy na DUT. Charakterizuje 15 chybových koeficientů. Nevýhodou je časová náročnost při provádění této metody. Oproti kalibrační metody **TOM** je nutné zapojovat jednotlivé standardy v párech. Uživatel tedy musí vlastnit 2 kalibrační standardy **Open**, **Match**. Dále je nutné zapojovat tyto standardy v párech (vyjma standardu **Through**) [28].

- **TSM (Through-Short-Match)**

Tato kalibrační metoda je velmi podobná kalibrační metodě **TOM**. Oproti metodě **TOM** se liší pouze použitým standardem **Short**. Vlastnosti těchto metod jsou jinak identické (přesnost kalibrace, charakterizace kalibračních koeficientů).

- **TOSM (Through-Open-Short-Match), SOLT (Short-Open-Load-Through)**

V praxi nejpoužívanější dvouportová kalibrační metoda v rámci koaxiálních vedení. Poskytuje vysokou přesnost a definuje 12 chybových koeficientů. Mimo jiné určuje chybové koeficienty i pro **Isolation error** (pouze u některých analyzátorů). Analyzátor, který touto metodou neposkytuje charakterizaci chyby **Isolation**, tak umí pomocí téhle metody definovat 10 chybových koeficientů. Kalibrační metoda používá na jednotlivých portech kalibrační metodu **OSM**. Pro propojení portů se využívá standardu **Through** (oba směry). Všechny standardy musí být zcela charakterizované.

- **SSST (Short-Short-Short-Through)**

Dvouportová metoda která využívá tři standardy **Offset Short** a standard **Through**. Všechny

standards jsou zcela charakterizované. Použitím standardů **Offset Short** omezujeme kmitočtové rozmezí kalibrace. Na druhou stranu jsou lépe realizovatelné na vysokém kmitočtu. Používají se tedy u vlnovodů a vysokofrekvenčního koaxiálního vedení (desítky GHz). Tato metoda dokáže přesně charakterizovat 10 chybových koeficientů.

- **SSLT (Short-Short-Load-Through)**

Kalibrační metoda která je velice podobná metodě **SSST**. Rozdílem je především nahrazení standardu **Offset Short** za standard **Load**. Metoda definuje 10 chybových koeficientů. Kalibrační technika **SSLT** především vyniká svou přesností na nízkých kmitočtech. Využívá se především u vlnovodů. Oproti **SSST** není tato metoda použitelná při vysokém kmitočtu. Důvodem je použitý standard **Load**.

- **TRL (Through-Reflect-Line), LRL (Line-Reflect-Line)**

Kalibrační metoda která využívá standardy **Through, Reflect, Line** (alternativně lze místo standardu **Through** použít další standard **Line**). Kalibrační metoda definuje 7 chybových koeficientů. Přibližně musí být známý fázový posuv standardu **Reflect**. Velikost činitele odrazu standardu **Reflect** musí být nenulová. Standardy **Through** a **Line** jsou ideálně impedančně přizpůsobeny. Oba tyto standardy musí mít rozdílnou elektrickou délku. Ideální impedanční přizpůsobení obou standardů definuje mnohem lepší přesnost kalibrace při určení chyby směrovosti (**Directivity error**). Délka standardu **Line** musí být částečně definována. Délka standardu **Through** musí být zcela charakterizována. Při použití dvou standardů **Line** je nutné délky obou standardů aspoň částečně definovat. Pokud používáme souběžně standardy **Through** a **Line**, tak je nutné dávat pozor na singularity, které se při použití této metody mohou objevit. **Rozdíl elektrické délky mezi oběma standardy nesmí být rovna násobků půlvlny**. Pokud tato podmínka není splněna, tak dochází k značným nepřesnostem po kalibraci analyzátoru [30].

Na základě této podmínky nemůžeme pomocí metody **TRL** měřit nízké kmitočty a velká kmitočtová rozmezí. Na druhou stranu není nutné využívat zcela charakterizované standardy (lze použít částečně charakterizované standardy **Line, Reflect, Line**). Metoda je dále závislá na kvalitě používaného vedení (standardy **Line, Through**). Výhodou je především vysoká přesnost i na vysokých kmitočtech. Standardy této metody lze lehce realizovat (pro vysoké kmitočty). Lze dále tuto metodu kombinovat s metodou **TRM**, tak aby byla kalibrace provedena i na nízkých kmitočtech. Dále je kalibrace velmi variabilní. Uživatel může používat hned několik standardů **Line** různých délek. Kalibrační metoda se tedy používá především pro koaxiální vedení (vysoké kmitočty), vlnovody a mikropáskové vedení (obecně planární obvody).

- **TRM (Through-Reflect-Match), LRM (Line-Reflect-Match)**

Je kalibrační metoda, která je velice podobná metodě **TOM**. Narozdíl od této metody se místo zcela definovaného standardu **Open** využívá částečně definovaný standard **Reflect**.

Ideální je, aby standard **Reflect** charakterizoval oba porty stejnou hodnotou činitele odrazu. Tato metoda se často používá společně s metodou **TRL**. Využívá se tedy pro nižší kmitočty a větší kmitočtové rozsahy (podle užití standardu **Through** nebo **Line**). Definuje 7 chybových koeficientů s vysokou přesností. Nepoužívá se však na vysokých kmitočtech (desítky GHz). Využití má především u mikropáskového vedení.

- **TRA (Through-Reflect-Attenuation), LRA (Line-Reflect-Attenuation)**

Metoda TRA využívá standardy **Through** nebo **Line**), **Reflect** a **Attenuation**. Definuje 7 chybových koeficientů. Kalibrační metoda má stejné vlastnosti jako **TRM**. Využívá se pro stejný kmitočet. Velkou výhodou této kalibrační metody je především využívání částečně definovaných kalibračních standardů. Nevyužívá tedy oproti **TRM** standard **Match**. Standard **Attenuation** musí být kvalitně impedančně přizpůsobený na obou portech. Útlum tohoto standardu musí být větší než 0 dB. Ostatní parametry není nutné pomocí standardu **Attenuation** specifikovat. Tato metoda se používá u mikropáskového vedení.

- **TNA (Through-Symmetrical Network-Attenuation)**

Je alternativou k metodám **TRA**, **TRL**. Nabízí velice podobné vlastnosti. Oproti metodě **TRA** používá místo standardu **Reflect** standard **Symmetrical Network**. Ideálně by měl tento standard mít stejné vlastnosti jako standard **Reflect**. Velikost činitele odrazu by měla být větší než nula. Fázový posuv by měl být částečně charakterizován. Velikost a fáze činitele odrazu musí být stejná na obou portech. Definuje 7 chybových koeficientů. Lze využít i pro relativně vysoké kmitočty (jednotky až desítky GHz). Dále lze použít i pro velké kmitočtové rozsahy. Používá se pouze u planárních obvodů.

- **UOSM (Unknown Through-Open-Short-Match), SOLR (Short-Open-Load-Reciprocal)**

Kalibrační metoda která je velmi podobná metodě **TOSM**. Definuje 10 nebo 12 koeficientů (záleží na použitém analyzátoru). Oproti metodě **TOSM** není nutné úplně definovat standard **Through**. Proto se místo **Through** využívá standard **Unknown Through**. Dále je možné využít tuto metodu, pokud máme na testovacích portech různé typy konektorů. Osobně ale doporučuji v takovém případě používat kalibrační metodu **Adapter Removal**. Použitý standard **Unknown Through** snižuje přesnost samotné kalibrace. V metodě **Adapter Removal** lze tuto nepřesnost matematicky odstranit.

- **SSLR (Short-Short-Load-Reciprocal)**

Kalibrační metoda je vlastnostmi ekvivalentní metodě **UOSM**. V praxi se používá především pro kalibraci vlnodů s obdélníkovým průřezem. Pro jednotlivé porty je nutné zapojit standardy **Short**, **Offset Short**, **Load**. Pro propojení portů se používá standard **Unknown Through**. Kalibrační metoda tedy není úplně přesná (oproti metodě **TOSM**), zato nepotřebujeme mít všechny kalibrační standardy charakterizované. Použitím standardu **Offset Short** omezujeme kmitočtový rozsah, ve kterém můžeme danou metodu použít (omezení na základě elektrické délky a geometrické délky standardu).

- **SSSR (Short-Short-Short-Reciprocal)**

Následující metoda je vlastnostmi ekvivalentní metodě **SSLR**. Oproti metodě **SSLR** není třeba definovat standard **Load**. Pro použití této metody je nutné vlastnit tři standardy **Offset Short** a jeden částečně charakterizovaný standard **Unknown Through**. Podle velikosti elektrické a geometrické délky jednotlivých standardů **Offset Short** lze analyzátor kalibrovat i pro velmi vysoké kmitočty (až 110 GHz). Použitím standardů **Offset Short** limitujeme kmitočtový rozsah, ve kterém můžeme danou metodu použít (omezení kmitočtového rozsahu na základě elektrické délky a geometrické délky standardu). Lze tedy měřit vysoké kmitočty, ale nemůžeme mít nastavený velký kmitočtový rozsah. V praxi se používá především pro kalibraci vlnovodů s obdélníkovým průřezem.

- **Adapter Removal**

Kalibrační metoda **Adapter Removal** rozšiřuje metodu **UOSM**. Využívá se hlavně v případech, kdy máme na jednotlivých testovacích portech rozdílné typy konektorů. Největší výhodou této metody je charakterizace nepřesností, které jsou způsobené standardem **Unknown Through** (adaptérem). Uživatel musí vlastnit 2 kalibrační sady (různé typy konektorů). Nejdříve uživatel provede **OSM** metodu na jednotlivých portech (odlišné typy konektorů). Potom se provede charakterizace standardu **Unknown Through**. Po charakterizaci jsou způsobené nepřesnosti odstraněny. Ve výsledku tak získáme přesnější výsledky, než kdybychom použili standard **UOSM**.

3.5 Kalibrační sady

Kalibrační sada poskytuje základní vybavení pro uživatelskou kalibraci analyzátoru. Každý typ používaného konektoru má svou specifickou kalibrační sadu. Při výběru kalibrační sady je nutné taky vzít v potaz, jaký typ a pohlaví konektoru chceme v měření používat a jaké kalibrační metody budeme používat. Dále závisí i na impedanci použitého koaxiálního kabelu. **Pro rozličná přenosová média (mikropáskové vedení, vlnovody s obdélníkovým průřezem) musíme využít odlišné kalibrační sady.**

Součástí kalibrační sady jsou většinou následující prvky:

1. **Kalibrační standardy** mohou být poskytnuty odděleně (viz obrázek č.3.2) nebo formou kalibrační klíčenky (viz obrázek č.3.3 a 3.4).
2. **USB flash disk** ve kterém jsou uložena **charakteristická data**. Charakteristická data (viz kapitola č.3.6.1) mohou být už předem nahrána v analyzátoru.
3. **Dokumentace ke kalibračním metodám**
4. **Volitelné příslušenství** – výrobcem dodávané kabely ke kalibraci

V laboratoři rádiových sítí (EB209) jsou momentálně k dispozici tři kalibrační sady:

1. Kalibrační sada ZCAN–75 Ω , typ N, varianty female i male (viz obrázek č. 3.2)
2. Kalibrační klíčenka **ZV-Z135** – 50 Ω , typ 3.5 mm female (viz obrázek č. 3.3)
3. Kalibrační klíčenka **ZV-Z170** – 50 Ω , typ N female (viz obrázek č. 3.4)

Kalibrační sada typu N male, female:



Obrázek 3.2: Základní kalibrační sada ZCAN–75 Ω

Kalibrační klíčková sada typu 3.5 mm female:



Obrázek 3.3: Klíčková kalibrační sada ZV-Z135 50 Ω

Kalibrační klíčenková sada typu N female:



Obrázek 3.4: Klíčenková kalibrační sada ZV-Z170 50 Ω

3.6 Typy kalibračních postupů

V praxi se setkáváme se dvěma základními postupy, jak zařízení můžeme kalibrovat:

1. Manuální kalibrace
2. Automatická kalibrace

3.6.1 Manuální kalibrace

Manuální kalibraci provádí sám uživatel. Uživatel tak musí mít přehled o jednotlivých kalibračních standardech a metodách.

Obecný postup při použití manuální kalibrace:

1. Uživatel si vybere, jakou chce použít kalibrační metodu (na základě použité kalibrační sady a chtěných parametrů).
2. Dále je nutné analyzátoru poskytnout charakteristická data. **Charakteristická data** jsou součástí kalibrační sady (USB flash disk), anebo můžou být předem nahrána do analyzátoru. Charakteristická data slouží k doplnění a porovnání parametrů, které jsou získány z jednotlivých kalibračních standardů. Charakteristická data kalibračního standardu jsou

uložena ve formě parametrů (charakteristická impedance, útlum způsobený šířením elektromagnetických vln kalibračním standardem, elektrická délka, fázový posuv), ze kterých si VNA dokáže vypočítat chybové koeficienty pro dané kmitočtové rozmezí. Poslední dobou se ale od tohoto trendu ustupuje a jako charakteristická data se využívají naměřené komplexní rozptylové parametry v závislosti na zvoleném kmitočtovém rozsahu. Výrobce naměřené S-parametry jsou uloženy jako Touchstone formát.

3. Podle zvolené kalibrační techniky musí uživatel připojit a načíst data z jednotlivých kalibračních standardů.
4. Analyzátor porovná načtená a charakteristická data. Na základě použité kalibrační metody analyzátor charakterizuje chybové koeficienty použitého chybového modelu.
5. VNA využije charakterizované chybové koeficienty k odstranění systémových chyb.
6. Kalibrace je provedena.

Manuální kalibrace představuje hned několik nevýhod:

1. **Časová náročnost kalibrace** je důsledkem manuálního zapojování a odpojování kalibračních standardů.
2. **Přesnost provedené kalibrace**, která může být ovlivněna nečistotami na konektorech. Dále může být přesnost ovlivněna zkušenostmi uživatele při připojování standardů. Uživatel může nevědomky použít odlišný kalibrační standard. Dále samotné kalibrační standardy už mohou být opotřebované.

Výhodou manuální kalibrace je především pořizovací cena kalibrační sady.

3.6.2 Automatická kalibrace

Manuální proces může být zdoluhavý a především nepřesný. Přední výrobci analyzátorů (Anritsu, Keysight, Rohde & Schwarz) proto nedávno představili automatickou kalibraci. Ta využívá speciální kalibrační zařízení (viz obrázek č.3.5), které umožňuje automaticky kalibrovat vektorový obvodový analyzátor. Nevýhodou automatické kalibrace je hlavně pořizovací cena kalibračního zařízení. Výhodou je potom přesnost a časová nenáročnost samotné kalibrace.

Obecný postup při použití automatické kalibrace: [31]

1. Kalibrační zařízení připojíme do testovací sestavy.
2. Uživatel si vybere, jakou chce použít kalibrační metodu.
3. Uživatel spustí na analyzátoru automatické kalibrování. Kalibrační zařízení umí automaticky přepínat mezi jednotlivými standardy. Charakteristická data jsou součástí kalibračního zařízení.

4. Kalibrační zařízení porovná načtená a charakteristická data. Na základě použité kalibrační metody analyzátor charakterizuje chybové koeficienty použitého chybového modelu.
5. VNA využije charakterizované koeficienty k odstranění systémových chyb.
6. Kalibrace je provedena.



Obrázek 3.5: Kalibrační zařízení ZN-Z151 [29]

3.7 Praktická doporučení k přesnému měření

Vektorový obvodový analyzátor nabízí bohatou funkcionalitu pro měření rozličných DUT. V rámci měření DUT je nutné si uvědomit, které funkce analyzátoru můžeme používat bez nutnosti přístroj recalibrovat. V krajních případech umožňuje VNA u některých funkcí využít interpolace. Pomocí interpolace dokáže VNA určit přibližné hodnoty změněného nastavení. Na druhou stranu uživatel nemusí znova kalibrovat analyzátor. **V některých následujících případech není nutné analyzátor hned recalibrovat. Závisí to především na použitém DUT (lineární/nelineární).** Doporučuji se řídit níže zmíněnými pravidly.

O recalibraci analyzátoru zvažujte v následujících případech: [21]

1. **Změnou v nastavení generátoru** (průměrování, typ rozmítání, generovaná výkonová úroveň). Recalibrace nemusí být nutně provedena, pokud obvod testovaného zařízení vykazuje lineární chování.
2. **Změnou kmitočtového rozsahu.** Pokud snížíte kmitočtový rozsah (např. pomocí měřících značek) v průběhu měření, tak analyzátor využije interpolaci. Pokud nastavíte větší kmitočet, tak je recalibrace nutná.
3. **Pokud jsou uvolněné konektory.**

Rekalibraci nemusíte provádět v těchto případech:

1. Při změně měřeného S parametru
2. Škálování osy Y
3. Změna zobrazení (formátu)

4 Názorné návody na nastavení analyzátoru ZND8

V rámci mé bakalářské práce byly vytvořeny 2 návody („Průvodce základním nastavením vektorového obvodového analyzátoru Rohde&Schwarz VNA ZND8“, „Průvodce pokročilým nastavením vektorového obvodového analyzátoru R&S VNA ZND8“), které popisují ovládání a nastavení vektorového obvodového analyzátoru R&S VNA ZND8.

Oba návody jsou z části přeloženy z dostupného anglického manuálu [30]. V rámci obou návodů jsem především čerpal ze svých zkušeností s měřením parametrů antén pomocí vektorového analyzátoru. Kombinací těchto prvků vznikly oba návody, které značně zjednodušují práci s analyzátořem oproti anglickému manuálu. V obou návodech se zabývám měřením parametru S_{11} a S_{22} u antén. Podstatu vysvětlených funkcí lze však aplikovat i u měření odlišného charakteru (například měření zisku u zesilovačů).

4.1 Průvodce základním nastavením analyzátoru R&S VNA ZND8

Tento návod především slouží k popisu ovládání a základního nastavení přístroje pro měření parametru S_{11} a S_{22} u antény.

Důraz jsem kladl na následující části:

1. Stručně popsat technické specifikace analyzátoru, který je umístěn v laboratoři rádiových sítí (učebna EB209).
2. Seznámit uživatele s jednotlivými tlačítky (základní funkcionality)
3. Popsat základní nastavení analyzátoru při samotném měření parametru S_{11} (od zapnutí přístroje, kalibraci až po export naměřených dat).

Průvodce základním nastavením vektorového obvodového analyzátoru Rohde&Schwarz VNA ZND8 je v příložené příloze soubor **vna-basic.pdf**.

4.2 Průvodce pokročilým nastavením analyzátoru R&S VNA ZND8

Návod slouží k pokročilému nastavení přístroje pro měření parametru S_{11} a S_{22} u antény. Jsou zde především popsány funkce, které umožňují zefektivnit a zpřesnit samotné měření. V rámci jednoduchého měření není nutné tento návod používat.

Příklady některých funkcí:

1. Nastavení generátoru (vysílaný výkon, průměrování, mezifrekvenční pásmo, typ frekvenčního rozmítání)
2. Nastavení osy Y

3. Práce s měřicími značkami (například značkování globálních a lokálních extrémů signálu)
4. Uložení kopie měření do paměti analyzátoru

Průvodce pokročilým nastavením vektorového obvodového analyzátoru R&S VNA ZND8 je v příložené příloze soubor **vna-advanced.pdf**.

5 Návrh laboratorní úlohy ověřující vlastnosti antény

Navržená laboratorní úloha (pod názvem „Měření rozptylového parametru S_{11} vybrané antény“) umožňuje studentům předmětu Radiokomunikační technika 1 si vyzkoušet práci s vektorovým obvodovým analyzátozem R&S VNA ZND8. Studenti budou mít především za úkol změřit parametr S_{11} u vybrané antény v kmitočtovém rozsahu od 100 kHz až 5 GHz. Dále musí studenti změřit nejmenší hodnotu parametru S_{11} a SWR. Mimo jiné musí popsat technologie, pro kterou je vybraná anténa optimalizována. Nakonec studenti porovnájí naměřené hodnoty parametru S_{11} se simulací provedenou v programu CST Studio.

Cílem je seznámit studenty s profesionálním analyzátozem R&S VNA ZND8 formou praktické úlohy. Na základě této úlohy si studenti předmětu Radiokomunikační technika 1 prohloubí znalosti související s impedančním přizpůsobením antény.

Zadání vytvořené laboratorní úlohy je v přiložené příloze soubor **m-S11.pdf**.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo uvést čtenáře do problematiky obvodových analyzátorů a kalibračních metod. Důraz byl především kladen na seznámení čtenáře s vektorovým obvodovým analyzátozem R&S VNA ZND8, kterým je vybavena laboratoř rádiových sítí (EB209).

V první kapitole byla provedena rešerše jednotlivých typů obvodových analyzátorů. Skalární obvodový analyzátor je levnější a slouží především k měření základních parametrů (SWR, RL), u kterých není třeba znát informaci o fázi. V praxi se především používá vektorový obvodový analyzátor, který umožňuje zaznamenat i fázi v obvodů. V další kapitole jsou nastíněny parametry antén, které lze změřit vektorovým analyzátozem. Dále byl proveden popis kalibrace vektorového obvodového analyzátoru včetně rešerše jednotlivých kalibračních metod, které slouží k odstranění systematických chyb. Pro měření jednoportových S-parametrů se především používá kalibrační metoda OSM. U víceportových S-parametrů je situace mnohem složitější. Vše se odvíjí od požadované přesnosti kalibrace (počtu chybových koeficientů), rychlosti měření, typu přenosového média a použitých kalibračních standardů.

Praktická část bakalářské práce měla za cíl popsat nastavení a ovládání vektorového analyzátoru R&S VNA ZND8 pro měření jednoportových parametrů (S_{11} , S_{22}) u antén. V rámci praktické části byly vytvořeny dva návody popisující práci s vektorovým obvodovým analyzátozem ZND8. Dále byla navržena laboratorní úloha pro studenty předmětu Radiokomunikační technika 1, která se týká měření parametru S_{11} u vybrané antény.

Vytvořené návody a poskytnuté záznamy z analyzátoru byly dále použity jako podklad pro videomanuály, které budou v budoucnu vytvořeny členy katedry telekomunikační techniky.

Bakalářskou práci lze dále rozšířit o názorné návody, které popisují nastavení přístroje v rámci měření parametrů filtrů a lokalizování chyb u kabelů (využití časové domény).

Literatura

- [1] Introduction to VNA Basics: Primer [online]. Beaverton: Tektronix, 2017 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: https://download.tek.com/document/70W_60918_0_Tek_VNA_PR1.pdf
- [2] R&S ZNB Vector Network Analyzer. In: ROHDE&SCHWARZ [online]. Mnichov: ROHDE&SCHWARZ, c2018 [cit. 2018-09-22]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/znb-productstartpage_63493-11648.html
- [3] Keysight Technologies: Network Analyzer Basics [online]. Kalifornie: Keysight Technologies, 2014 [cit. 2018-10-02]. 5965-7917E. Dostupné z: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-7917E.pdf?id=1000001258-1:epsg:tcn>
- [4] MEASUREMENT FUNDAMENTALS: Network Analysis. In: Keysight Technologies [online]. California: Keysight Technologies, c2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/zz/en/solutions/measurement-fundamentals/network-analysis.html>
- [5] Agilent AN 1287-2 Exploring the Architectures of Network Analyzers: Application Note [online]. 2. dopl. vyd. Kalifornie: Agilent Technologies, 2000 [cit. 2018-09-24]. 5965-7708E. Dostupné z: <http://anlage.umd.edu/Microwave%20Measurements%20for%20Personal%20Web%20Site/Architecture%20of%20NWAs%205965-7708E.pdf>
- [6] POOLE, Ian. Scalar Network Analyzer, SNA. Radio-Electronics.com: Resources and analysis for electronics engineers [online]. Surrey: Adrio Communications [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: https://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/rf-network-analyzer/scalar-network-analyser-sna.php
- [7] Keysight Technologies: Scalar Network Analyzer [online]. Kalifornie: Keysight Technologies, 2014 [cit. 2018-09-12]. 5990-4798EN. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-4798EN.pdf>
- [8] Network Analyzer basics. RF Wireless World [online]. RF Wireless World, c2012 [cit. 2018-09-24]. Dostupné z: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/SNA-Scalar-Network-Analyzer-vs-VNA-Vector-Network-Analyzer.html>
- [9] LAPČÍK, Josef. Měření na vektorovém obvodovém analyzátoru. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Dřínovský.

- [10] All About Direct Digital Synthesis. AnalogDialogue [online]. Munich: Analog Devices, c2019, Aug 2004 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/all-about-direct-digital-synthesis.html>
- [11] Directional Couplers. In: Microwaves101.com [online]. Tucson: Microwaves101, c2018 [cit. 2018-10-02]. Dostupné z: <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/directional-couplers>
- [12] DEMARTINO, Chris. Brushing Up on Network Analyzer Fundamentals. Microwaves&RF. [online]. USA: Informa USA, 2018 [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: <https://www.mwrf.com/test-measurement/brushing-network-analyzer-fundamentals>
- [13] MARTINEZ, Marcos. Design and implementation of a compact Vector Network Analyzer [online]. Madison, 2012 [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/34999/MartinezArgudo,%20Marcos_Movilidad_Abierto.pdf?sequence=1. Diplomová práce. University of Wisconsin-Madison.
- [14] ZMEŠKAL, Vladimír. Měření na vektorovém analyzátoru. Ostrava, 2010. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Tomáš Pavelek.
- [15] Specification DG8SAQ VNWA 3 and 3EC. SDR-Kits [online]. Melksham: SDR-Kits, c2018 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://www.sdr-kits.net/DG8SAQ-VNWA3-3E-specification>
- [16] REEVE, Whitham. Building an S-Parameter Test Set for the VNWA-3E [online]. Anchorage: W. Reeve, c2013 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: http://www.reeve.com/Documents/Articles%20Papers/Reeve_S-ParamTestSet.pdf
- [17] BÍLEK, Jan. VNWA – víceúčelový VF měřicí přístroj [online]. OK1TIC, 2010 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <http://okitic.nagano.cz/?download=VNWA.pdf>
- [18] POOLE, Ian. Software Defined Radio. Radio-Electronics.com [online]. Surrey: Adrio Communications [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/sdr/software-defined-radios-tutorial.php>
- [19] Network Theory - Two-Port Networks. Tutorialspoint [online]. Hajdarábád: tutorialspoint, c2018 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/network_theory/network_theory_twoport_networks.htm
- [20] MITTAL, Himanshu. Linear 2-Port Network Parameters. In: Gradeup [online]. Indie: GradeStack Learning, 2018 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://gradeup.co/gate-219-study-notes-2-port-network-i-52f5d555-bea2-11e5-8bd2-abb387fb251f>

- [21] Fundamentals of Vector Network Analysis: Primer [online]. Version 1.1. Kolumbie: Rohde & Schwarz USA, c2008 [cit. 2018-08-12]. Dostupné z: <https://www.signalintegrityjournal.com/ext/resources/White-papers-App-notes/Vector-Network-Analyzer-Fundamentals-Primer.pdf?1520951631>
- [22] Zkreslení impulsu televizního signálu. Encyklopedie fyziky [online]. Praha: Jaroslav Reichl, c2006-2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1382-zkresleni-impulsu-televizniho-signalu>
- [23] NOSHERWAN, Shoaib. Vector Network Analyzer (VNA) Measurements and Uncertainty Assessment. Švýcarsko: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-44771-1.
- [24] MORAVEK, Ondrej, Milan PRIHODA a Karel HOFFMANN. Verification technique of on-planar VNA calibration. In: Proceedings of 22nd International Conference Radioelektronika 2012 [online]. April. Brno: IEEE, 2012, s. 1-4 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/301326973_Verification_technique_of_on-planar_VNA_calibration
- [25] Understanding Vector Network Analysis [online]. USA: Anritsu Company, c2017 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z: http://www.rekirsch.at/user_html/1282834349/pix/a/media/ME7838A/Understanding_Vector_Network_Analysis.pdf
- [26] HIEBEL, Michael. Vector Network Analyzer (VNA) Calibration: The Basics [online]. Kolumbie: Rohde & Schwarz USA, c2008 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2497/8e60b68a24a4169eecbd0763d4a9287037e4.pdf>
- [27] Keysight Technologies: Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers [online]. Kalifornie: Keysight Technologies, 2016 [cit. 2019-4-15]. 5989-4840EN. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-4840EN.pdf>
- [28] Vector Network Analyzers ZVM, ZVK [online]. Munich: Rohde&Schwarz, c2019 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: https://accusrc.com/uploads/datasheets/7518_zvm.pdf
- [29] R&S ZND Vector Network Analyzer: Basic, solid-performance network analysis [online]. Version 2.0. Munich: Rohde&Schwarz, 2017 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZND_bro_en_3607-0381-12_v0200.pdf
- [30] R&S ZNC/ZND Vector Network Analyzers: User Manual [online]. Version 36. Munich: Rohde&Schwarz, c2018 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z:

https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/znc_1/ZNC_ZND_UserManual_en_36.pdf

- [31] Understanding VNA Calibration [online]. City of Richardson: Anritsu Company, c2012 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://anlage.umd.edu/Anritsu_understanding-vna-calibration.pdf

Přílohy

Tištěné přílohy:

- i. Průvodce základním nastavením vektorového obvodového analyzátoru Rohde&Schwarz ZND8 (30 stran)
- ii. Průvodce pokročilým nastavením vektorového obvodového analyzátoru R&S ZND8 (21 stran)
- iii. Měření rozptylového parametru S_{11} vybrané antény (6 stran)

Elektronické přílohy (přílohy v IS EDISON):

- i. Průvodce základním nastavením vektorového obvodového analyzátoru Rohde&Schwarz ZND8 (soubor **vna-basic.pdf**)
- ii. Průvodce pokročilým nastavením vektorového obvodového analyzátoru R&S ZND8 (soubor **vna-advanced.pdf**)
- iii. Měření rozptylového parametru S_{11} vybrané antény (soubor **m-S11.pdf**)



Katedra
telekomunikační techniky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava

Průvodce základním nastavením vektorového obvodového analyzátoru Rohde&Schwarz ZND8

Měření parametrů S_{11} a S_{22}

Datum: 3.2.2019
Autor: Tomáš Macák
Kontakt: tomas.macak.st@vsb.cz

Obsah

1	Popis analyzátoru Rohde&Schwarz ZND8	2
1.1	Stručný popis tlačítek	4
1.1.1	TRACE	4
1.1.2	STIMULUS	4
1.1.3	CHANNEL	5
1.1.4	SYSTEM	5
1.1.5	DATA ENTRY	6
1.1.6	CONTROL	6
1.1.7	Porty	7
1.1.8	Tlačítko Standby a indikátory	7
2	Základní nastavení analyzátoru ZND8	8
2.1	Zapnutí přístroje	8
2.2	Nastavení kmitočtu (osy X)	8
2.3	Nastavení počtu generovaných bodů	9
2.4	Kalibrace analyzátoru	10
2.4.1	Stručný popis kalibrace	10
2.4.2	Kalibrační standardy	11
2.4.3	Kalibrační metody	11
2.4.4	Kalibrační sady	11
2.4.5	Postup kalibrace analyzátoru ZND8	14
2.5	Nastavení rozptylových parametrů	17
2.6	Reprezentace výsledných dat	18
2.7	Přidání nových grafů a diagramů	19
2.8	Přidání měřících značek	21
2.9	Export měřených dat	22
2.10	Tisk a export diagramů	26
2.11	Uložení konfigurace analyzátoru	27
2.12	Načtení konfigurace analyzátoru	28

1 Popis analyzátoru Rohde&Schwarz ZND8

Vektorový obvodový analyzátor Rohde&Schwarz ZND8 slouží k analýze elektrických obvodů v kmitočtovém rozmezí 100 kHz až 8.5 GHz. Pomocí analyzátoru ZND8 můžeme změřit například S, Z nebo Y parametry. Dále se používá pro zjištění fázového průběhu signálu. Analyzátor se používá především pro měření parametrů VF obvodů (antén, vf filtrů a tranzistorů). Generovaný signál procházející testovaným zařízením (DUT) můžeme analyzovat jak ve frekvenční tak i v časové oblasti. Lze tak například lokalizovat chybu v měřeném kabelu.

Pro charakterizaci vysokofrekvenčních obvodů se používají S-parametry (rovněž nazývané jako rozptylové parametry). Součástí analyzátoru ZND8 jsou dva vestavěné porty, a proto můžeme tímto zařízením měřit pouze rozptylové parametry S11, S12, S21, S22.

Parametry S11 a S22 jsou jednoportové rozptylové parametry, které se používají zejména pro zjištění kvality impedančního přizpůsobení obvodu na zvoleném kmitočtu. Parametr S11 slouží ke zjištění SWR, vstupní impedance zařízení, činitele odrazu a zpětného útlumu na vstupním portu. Parametr S22 se využívá na výpočet SWR, výstupní impedance a zpětného útlumu pro výstupní port. Rozptylové parametry můžeme zobrazit pomocí kartézského, Smithova nebo polárního diagramu.

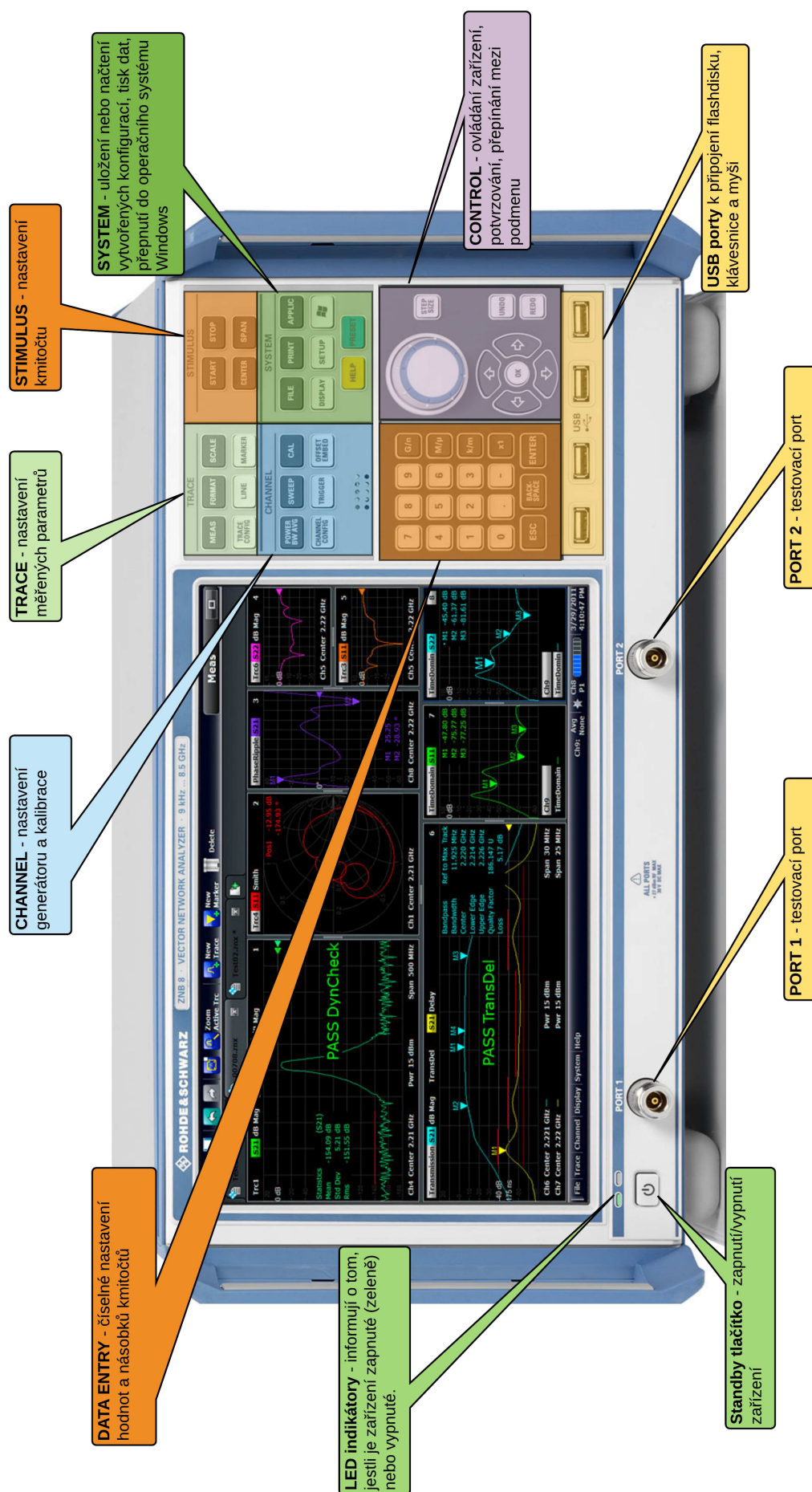
V rámci tohoto návodu se dozvíte, jak správně nakonfigurovat analyzátor ZND8 pro měření parametrů S11 a S22. Zjistíte, že postup pro měření těchto parametrů je velmi podobný, jen pro parametr S11 probíhá konfigurace a měření na vstupním portu a u parametru S22 na portu výstupním.

Stručná specifikace používaného analyzátoru ZND8	
Frekvenční rozmezí	100 kHz – 8.5 GHz
Počet testovacích portů	2
Typ testovacích portů	50 Ω , N female
Dynamický rozsah	130 dB
Počet generovaných bodů	2 – 5001
Výkonový rozsah generátoru	-45 dBm – +3 dBm
Mezifrekvenční pásmo	1 Hz – 300 kHz
Operační systém	Windows Embedded Standard 7
Zobrazení	12.1" dotykový LCD displej

Tabulka 1.1: Parametry R&S ZND8 v laboratoři rádiových sítí EB209 [1–3]

Důležité pojmy:

1. **Trace** – jeden měřený graf
2. **Diagram** – soubor jednoho nebo více měřených grafů (lze rozdělit pracovní plochu na více diagramů)
3. **Konfigurace (kanál)** – nastavení celkového měření (generátoru)



Obr. 1.1: Zjednodušený popis vektorového obvodového analyzátoru ZND8 [4]

1.1 Stručný popis tlačítek

Podle obrázku č.1.1 lze funkcionalitu vektorového analyzátoru rozdělit do několika částí. Patří zde části jako **TRACE**, **STIMULUS**, **CHANNEL**, **SYSTEM**, **DATA ENTRY**, **CONTROL**. Dalšími funkčními bloky analyzátoru jsou testovací a USB porty, LED indikátory a tlačítko ke spuštění analyzátoru. V rámci této kapitoly budete seznámeni se základní funkcionalitou jednotlivých sekcí a jejich tlačítek.

1.1.1 TRACE



Tlačítka funkční části **TRACE** slouží především k nastavení měřeného rozptylového parametru. Dále zde můžeme nastavit osu Y, formát získaných výsledků, diagramy nebo měřicí značky.

- *MEAS* nám umožňuje vybrat, jaký S-parametr chceme změřit.
- *FORMAT* definuje, jak budou výsledná data reprezentována (například kartézský diagram, SWR, Smithův diagram).
- *SCALE* nastavuje svislou osu Y, měřítko mřížky osy Y a referenční úroveň.
- *TRACE CONFIG* vytváří nové diagramy a měření v rámci jednoho souboru. Uživatel tak může například rozdělit obrazovku na několik diagramů, ve kterých lze měřit rozličné S-parametry. Více diagramů lze použít i pro souběžné zobrazení rozptylového parametru v různých formátech zobrazení.
- *LINE* vytváří mezní limity grafu. Používá se k nastavení limitních testů.
- *MARKER* vytváří a konfiguruje měřicí značky (markery).

1.1.2 STIMULUS



Pomocí tlačítek v sekci **STIMULUS** můžeme nastavit kmitočtový rozsah (vodorovná osa X).

- *START* definuje počáteční kmitočet měření.
- *STOP* určuje konečný kmitočet měření.
- *CENTER* nastavuje středovou frekvenci.
- *SPAN* stanovuje šířku frekvenčního kanálu.

1.1.3 CHANNEL



Tlačítka v části **CHANNEL** umožňují uživateli nastavit parametry generovaného signálu. Dále poskytují uživateli možnost analyzátor kalibrovat.

- *POWER BW AVG* nastavuje vysílaný výkon, šířku mezifrekvenčního pásma a průměrování hodnot.
- *SWEEP* definuje počet generovaných bodů v rámci vybraného kmitočtového rozsahu. Dále lze definovat frekvenční krok mezi jednotlivými body.
- *CAL* poskytuje funkce pro kalibraci analyzátoru.
- *CHANNEL CONFIG* slouží ke konfiguraci kanálů. Jednotlivé kanály slouží k měření parametrů v identickém kmitočtovém rozsahu při odlišném nastavení generovaného signálu.
- *TRIGGER* určuje začátek měřící sekvence.
- *OFFSET EMBED* posouvá rovinu měření.

1.1.4 SYSTEM



V části **SYSTEM** uživatel může uložit a načítat své vytvořené konfigurace analyzátoru. Lze zde i provést export výsledků měření v různých formátech (formou obrázků nebo i datových řad). Dále tato sekce slouží k přepínání mezi softwarem pro měření analyzátozem a operačním systémem Windows. V poslední řadě zde může uživatel nastavit tisk výsledků svých měření.

- *FILE* umožňuje vytvořit, uložit nebo nahrát novou konfiguraci ve formátu .znx.
- *PRINT* slouží k tisku a exportu zobrazených diagramů. Exportovat lze do formátů .bmp, .jpg, .pdf, .png, .svg nebo .xps.
- *APPLIC* spouští externí aplikace a další přídatné programy, které jsou součástí softwaru od firmy Rohde&Schwarz. Patří zde například textový editor nebo softwarová klávesnice.
- *DISPLAY* přidává a maže vytvořené diagramy. Pro správu diagramů se jedná o přehlednější alternativu k možnostem tlačítka *TRACE CONFIG*.
- *SETUP* nastavuje systém (výchozí stav, uživatelské rozhraní a další).
- *WINDOWS* zobrazí uživateli nabídku Start operačního systému Windows.
- *HELP* otevře pomocný systém pro práci s analyzátozem.
- *PRESET* uvede analyzátor do výchozího stavu.

1.1.5 DATA ENTRY

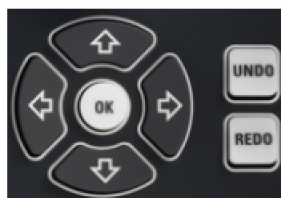


Sekce **DATA ENTRY** slouží pro zadávání číselných hodnot a násobků kmitočtu (GHz, MHz, kHz, Hz). Dále slouží k potvrzování nebo zrušení zadaných hodnot. Alternativním způsobem zadávání hodnot může být softwarová nebo hardwarová klávesnice, kterou lze připojit pomocí USB konektoru.

1.1.6 CONTROL

Tlačítka v této části se používají pro ovládání samotného analyzátoru. Využívají se především pro přecházení mezi jednotlivými kolonkami v rámci jednoho podmenu.

- *Navigační šipky* dovolují uživateli přepínat mezi jednotlivými položkami v rámci jednoho podmenu.
- *OK* se využívá k potvrzování dialogů a číselných hodnot. Je ekvivalentní k tlačítku *ENTER*, které lze nalézt v sekci *DATA ENTRY*.
- *UNDO* zruší poslední provedenou akci.
- *REDO* obnoví poslední provedenou akci, která byla zrušena tlačítkem *UNDO*.



- *Otočný regulátor* má stejné použití jako *Navigační šipky*. Zmáčknutí regulátoru odpovídá funkci tlačítka *OK*.
- *STEP SIZE* konfiguruje číselné krokování při otáčení regulátorem.



1.1.7 Porty

- **Testovací porty**

Analyzátor je vybaven dvěma testovacími porty. Uživatel má možnost jednotlivé porty konfigurovat dle potřeby jako vstupní nebo výstupní. Ve **výchozím a preferovaném nastavení** je *PORT 1* vstupním portem (používá se pro měření parametru S_{11}). *PORT 2* je portem výstupním (využívá se pro měření parametru S_{22}). Při použití obou portů můžeme měřit přenosové charakteristiky S_{21} a S_{12} . Oba porty jsou osazeny konektory typu N.

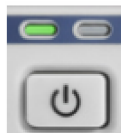


- **USB porty**

Analyzátor je vybaven čtyřmi USB 2.0 porty. Tyto porty můžete využít například k připojení klávesnice, počítačové myši nebo flash disku.



1.1.8 Tlačítko Standby a indikátory

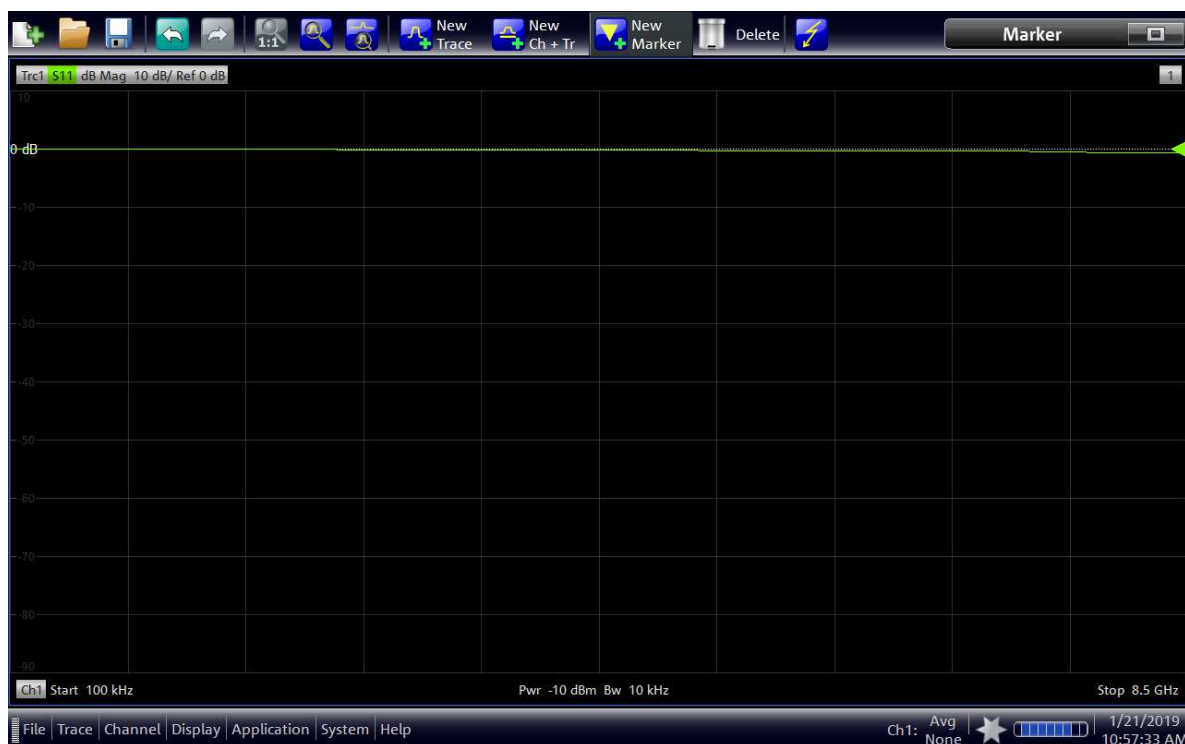


Tlačítkem *Standby* uživatel spustí analyzátor. Zeleně svítící dioda indikuje zapnutý přístroj.

2 Základní nastavení analyzátoru ZND8

2.1 Zapnutí přístroje

Zařízení zapnete pomocí hardwarového tlačítka *Standby*, které je umístěné na levém spodním rohu analyzátoru. Nejdříve se nabootuje operační systém Windows 7 a potom se automaticky spustí program pro práci s vektorovým analyzátořem (viz obrázek č. 2.1).



Obr. 2.1: Prostředí programu od firmy Rohde&Schwarz

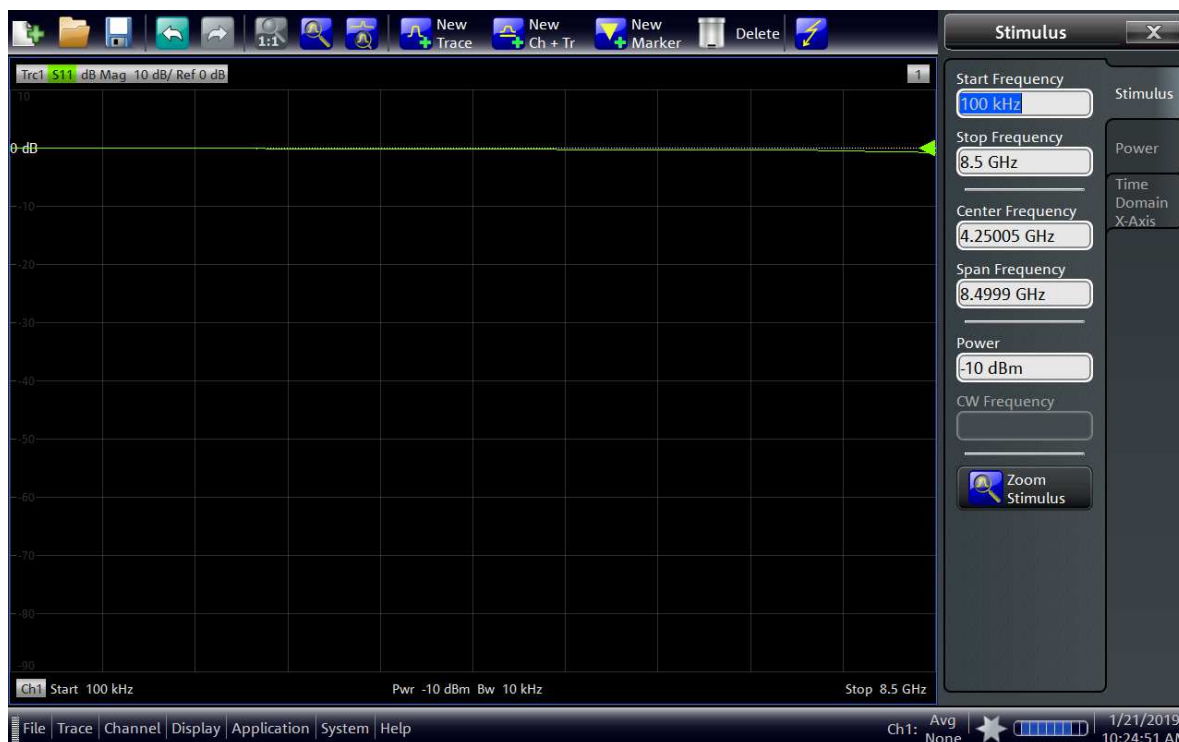
2.2 Nastavení kmitočtu (osy X)

Kmitočtový rozsah lze zadat několika způsoby. Nejpoužívanějším způsobem je stanovení počátečního a koncového kmitočtu. Alternativně lze osu X taky nastavit pomocí středové frekvence a rozsahu frekvenčního kanálu. Jednotlivé hodnoty kmitočtu zadáváme ve tvaru číselná hodnota kmitočtu + násobek G/M/k Hz.

Kmitočtet nastavujeme následujícím způsobem (viz obrázek č. 2.2):

- Pro nastavení počáteční frekvence stiskněte v části **STIMULUS** tlačítko *START*. V podmenu **Stimulus** zadejte počáteční frekvenci *Start Frequency*.
- Pro nastavení koncového kmitočtu slouží kolonka *Stop Frequency*, která je součástí podmenu **Stimulus**. Koncovou frekvenci můžete taky stanovit stisknutím tlačítka *STOP* v části **STIMULUS**.
- Středovou frekvenci nastavujeme v podmenu **Stimulus** v kolonce *Center Frequency*. Středovou frekvenci lze taky nastavit stisknutím tlačítka *CENTER*, které se nachází v části **STIMULUS**.

- Šířku kanálu lze nastavit v kolonce *Span Frequency*. Mimoto lze šířku kanálu nastavit stisknutím tlačítka *SPAN*, které se nachází v části **STIMULUS**.

Obr. 2.2: Podmenu položka **Stimulus**

2.3 Nastavení počtu generovaných bodů

Vektorový obvodový analyzátor umožňuje nastavit i počet generovaných bodů v rámci zadaného kmitočtového rozsahu. Větší počet bodů umožňuje uživateli získat věrohodnější výsledky. Nevýhodou je především snížená rychlost při zpracování a zobrazení měřených bodů. Případně lze nastavit velikost frekvenčního kroku mezi jednotlivými body. Na základě velikosti frekvenčního kroku doplní analyzátor počet generovaných bodů.

Počet generovaných bodů stanovte následovně (viz obrázek č. 2.3):

- Pro nastavení počtu generovaných bodů stiskněte tlačítko *SWEEP* v sekci **CHANNEL**. V podmenu **Sweep Params** запиšte do kolonky *Number of Points* počet generovaných bodů.
- Velikost frekvenčního kroku se nastavuje také v podmenu **Sweep Params** pod kolonkou *Freq Step Size*.



Obr. 2.3: Podmenu položka Sweep Params

2.4 Kalibrace analyzátoru

2.4.1 Stručný popis kalibrace

Kalibrace je nedílnou a nutnou součástí každého počátečního nastavení analyzátoru. Slouží k odstranění systémových chyb. Do těchto chyb částečně spadají elektrické obvody použité v analyzátoru (použití směrových odbočnic). Mimo jiné zde můžeme zařadit chyby, které souvisí s vnitřní frekvenční odezvou analyzátoru. Při měření vektorovým analyzátozem požadujeme, aby analyzátor měřil spolehlivě a především konzistentně.

Vlivem připojení koaxiálního kabelu nebo redukce dochází k tomu, že do samotného měření přidáváme vložný útlum a zároveň odlišnou frekvenční odezvu. Tyto neduhy zásadně ovlivňují opakovatelnost daného měření. Řešením těchto problémů je zmíněná kalibrace. Výchozí kalibrace je provedena na jednotlivých testovacích portech. Kalibrované oblasti nazýváme referenční roviny.

Jelikož vektorový analyzátor umožňuje měřit reálnou i imaginární složku jednotlivých rozptylových parametrů, tak je možné využít vektorová data pro vlastní uživatelskou kalibraci. **Uživatelská kalibrace dovoluje uživateli přesunout referenční rovinu tak, aby byla celá měřicí sestava kalibrována včetně kabelů a dalších připojených prvků.** Ve výsledku tak získáme mnohem přesnější a především konzistentní výsledky. Na druhou stranu, špatně kalibrovaný přístroj může poskytovat méně přesné výsledky, než kdybyste analyzátor nekalibrovali. **Pro kalibraci je nutné načíst vektorová data z určitých kalibračních standardů za použití vhodných kalibračních metod.**

2.4.2 Kalibrační standardy

Kalibrační standardy poskytují referenční data ke kalibračnímu procesu. Kalibrační standardy jsou charakteristické elektrické obvody, u kterých jsou předem známy jejich parametry (velikost a fáze). Tyto parametry analyzátor načte a uloží.

Pro měření jednoportových S-parametrů stačí použít následující kalibrační standardy:

- *Open* – spojení naprázdno (otevřený konec)
- *Short* – spojení nakrátko (zkratovaný konec)
- *Match* nebo *Load* – impedančně přizpůsobený elektrický obvod

2.4.3 Kalibrační metody

Kalibrační metody slouží k obdržení potřebných dat z kalibračních standardů pro korekci chyb. Podle názvu kalibrační metody lze rozeznat, jaké standardy jsou pro danou metodu nutné a pořadí, v jakém jednotlivé standardy musíme připojit. Každá metoda má své využití. Především to závisí na typu rozptylového parametru. Dále záleží na přesnosti, rychlosti měření a na použitém kmitočtu. Při měření jednoportových S-parametrů lze použít všechny dostupné kalibrační metody.

Analyzátor ZND8 umožňuje využít následující jednoportové kalibrační metody:

- *Refl Norm Open* – použit jeden standard *Open*, není přesné
- *Refl Norm Short* – použit jeden standard *Short*, není přesné
- **OSM (Open Short Match)** – využity standardy *Open*, *Short*, *Match*, přesné, rychlé, výhodné pro měření parametrů S11 (resp. S22)

V kapitole 2.4.5 bude představena kalibrační metoda *OSM* v praxi.

2.4.4 Kalibrační sady

Kalibrační sada poskytuje základní vybavení pro správnou kalibraci analyzátoru. Každý typ používaného konektoru má svou specifickou kalibrační sadu. Při kalibraci je nutné vzít v potaz, jaký typ konektoru je použit. Záleží i na impedanci použitého koaxiálního kabelu.

Součástí základní kalibrační sady (viz obrázek č. 2.4) jsou většinou následující prvky:

1. Kalibrační standardy *Open*, *Short*, *Match*, *Through*
2. USB flash disk s charakteristickými daty
3. Dokumentace ke kalibračním metodám
4. Volitelné příslušenství – výrobcem dodávané kabely ke kalibraci



Obr. 2.4: Základní kalibrační sada ZCAN 75 Ω

Firma Rohde&Schwarz vyrábí unikátní klíčenkové kalibrační sady, které nepotřebují importovat charakteristická data z USB flash disku. Veškeré data už jsou předem importována do Rohde&Schwarz analyzátoru ZND8.

Kalibrační klíčenková sada typu 3.5 mm female (viz obrázek č. 2.5):



Obr. 2.5: Klíčenková kalibrační sada ZV-Z135 50 Ω

Kalibrační klíčenková sada typu N female (viz obrázek č.2.6):



Obr. 2.6: Klíčenková kalibrační sada ZV-Z170 50 Ω

V laboratoři rádiových sítí (EB209) jsou momentálně k dispozici tři kalibrační sady:

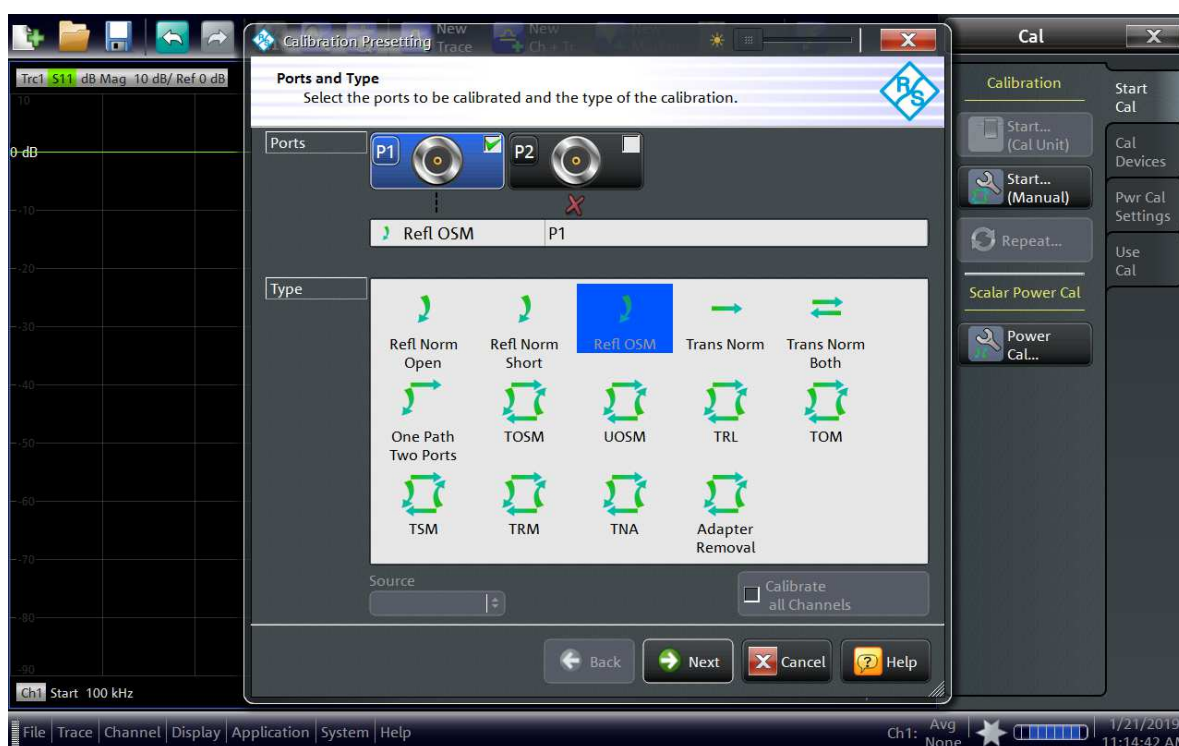
1. Kalibrační sada ZCAN-75 Ω , typ N, varianty female i male (viz obrázek č. 2.4)
2. Kalibrační klíčenka **ZV-Z135** – 50 Ω , typ 3.5 mm female (viz obrázek č. 2.5)
3. Kalibrační klíčenka **ZV-Z170** – 50 Ω , typ N female (viz obrázek č. 2.6)

2.4.5 Postup kalibrace analyzátoru ZND8

Pro ukázkou kalibrace analyzátoru ZND8 použijí kalibrační klíčenku **ZV-Z170**. Pro ostatní kalibrační sady platí při kalibraci stejné kroky pouze s odlišným nastavením jednotlivých parametrů. Je tedy nutné se orientovat v parametrech kalibračních sad. **Používanou verzi klíčenkové sady poznáte na štítku, který je umístěn na zadní straně sady.**

Kalibrace analyzátoru ZND8 kalibrační metodou OSM:

1. V sekci **CHANNEL** stiskněte tlačítko *Cal*. V podmenu **Start Cal** zvolte možnost *Start...(Manual)*. Pokud budete měřit parametr S11, tak v novém dialogu *Calibration Presetting* (viz obrázek č. 2.7) v kolonce *Ports* vyberte možnost *P1*. Při měření parametru S22 zvolte možnost *P2*. V sekci *Type* vyberte typ kalibrace. V našem případě označte možnost *Refl OSM* a stiskněte tlačítko *Next*.



Obr. 2.7: Dialogové okno *Calibration Presetting*

2. V dalším kroku (viz obrázek č. 2.8) je nutné vybrat pomocí rozbalovacího menu v části *Connector* typ konektoru a impedanci používaného koaxiálního kabelu. V našem případě využijeme kalibrační sadu verze **ZV-Z170**. Parametry této kalibrační sady jsou popsány v kapitole 2.4.4. Z těchto parametrů můžeme vyčíslit, že pro propojení koaxiálního kabelu s jednotlivými kalibračními standardy je nutné, aby koaxiální kabel byl typu N 50 Ω . Zvolte tuto možnost v části *Connector*.

Pohlaví použitého kabelu musí být opačné vůči pohlaví konektorů kalibrační sady. V našem případě zvolíme v kolonce *Gender* možnost *Male*, protože kalibrační sada **ZV-Z170** má konektory typu female.

V kolonce *Cal Kit* vyhledejte a zvolte verzi používané kalibrační sady. V našem případě je to verze **ZV-Z170**. Kalibrační proces máme nastaven. Dále stiskněte tlačítko *Start*.



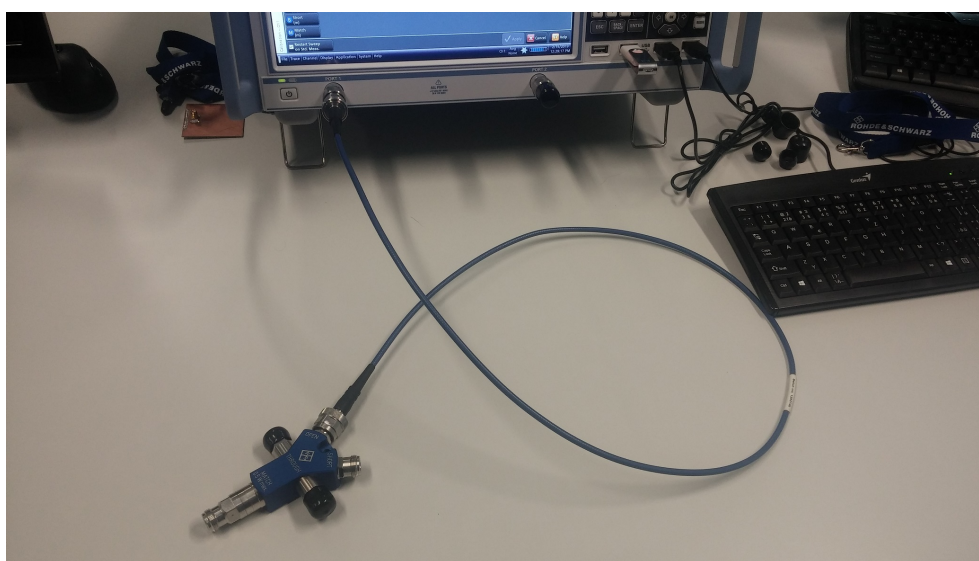
Obr. 2.8: Pokračování dialogového okna *Calibration Presetting*

3. Stisknutím tlačítka *Start* se objeví na pracovní ploše celý kalibrační proces **OSM** metody (viz obrázek č. 2.9). V horní části si můžete všimnout dvou diagramů. Levý diagram značí amplitudu a druhý diagram fázi. Ve spodní polovině lze vidět průběh kalibrace.



Obr. 2.9: Kalibrační okno metody OSM

4. V dalším kroku musíte připojit koaxiální kabel s příslušným konektorem k testovacímu portu *PORT 1*. Pokud kalibraci provádíte na výstupním portu (měření parametru S_{22}), tak připojte konektor koaxiálního kabelu k portu *PORT 2*. Druhý konec koaxiálního kabelu pevně našroubujte na kalibrační standard *Open* (viz obrázek č. 2.10). Po připojení kalibračního standardu stiskněte ve spodní části programu (viz obrázek č. 2.9) tlačítko *Open (m)*. Tímto způsobem načtete charakteristická data z kalibračního standardu *Open*.



Obr. 2.10: Zapojení koaxiálního kabelu, analyzátoru a kalibračního standardu

5. Předchozí krok zopakujte pro kalibrační standardy *Short* a *Match*.
6. Po načtení veškerých dat by měla vypadat dolní polovina displeje jako na obrázku č. 2.11. Kliknutím tlačítka *Apply* potvrďte kalibraci.



Obr. 2.11: Dokončený kalibrační proces

7. Volitelně můžete zkontrolovat přesnost provedené kalibrace pomocí Smithova diagramu. Kontrola kalibrace je vysvětlena v pokročilém nastavení analyzátoru ZND8.
8. V této fázi už můžete připojit měřenou anténu k posunuté referenční rovině.

2.5 Nastavení rozptylových parametrů

Podle kalibrovaného portu a druhu měření vyberte správný rozptylový parametr. Více o rozptylových parametrech S_{11} a S_{22} naleznete v kapitole č. 1.

Výběr parametru proveďte následujícím způsobem (viz obrázek č. 2.12):

- Parametr S_{11} lze nastavit stisknutím tlačítka *MEAS* v části **TRACE**. V podmenu **S-Params** naleznete kolonku *S-Parameter*. Kliknutím otevřete rozbalovací menu, ve kterém zvolte parametr S_{11} .
- Parametr S_{22} nastavujeme také v podmenu **S-Params**. V rozbalovacím menu zvolíte parametr S_{22} .
- Všechny parametry lze zvolit položkou *All S-Params*.



Obr. 2.12: Podmenu položka S-Params

2.6 Reprezentace výsledných dat

Vektorový analyzátor umožňuje reprezentovat výsledky hned několika způsoby. V rámci tohoto návodu si ukážeme, jak zvolit zobrazení kartézského diagramu a SWR. U kartézského diagramu určuje osa X kmitočtový rozsah a osa Y velikost měřeného parametru v decibelech. V jednom diagramu lze mít pouze jeden zvolený formát.

Zvolení formátu proveďte následovně (viz obrázek č. 2.13):

- Kartézský diagram nastavíte stisknutím tlačítka *FORMAT* v části **TRACE**. V podmenu **Format** zvolte možnost *dB Mag*.
- Pro zvolení formátu SWR klikněte v podmenu **Format** na možnost *SWR*.

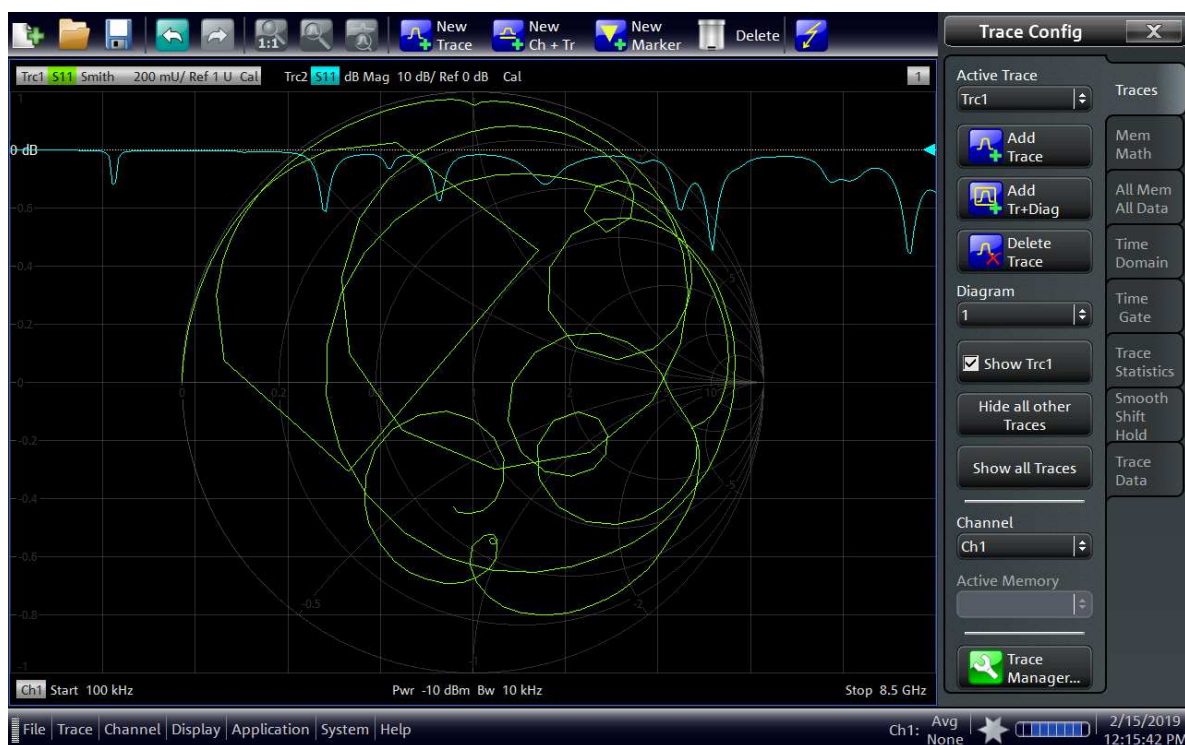
Obr. 2.13: Podmenu položka **Format**

2.7 Přidání nových grafů a diagramů

Diagramy rozdělí pracovní plochu na části, které umožňují totožné měření zobrazit v různých formátech. Přidání další stopy (grafu) nám umožní v rámci jednoho diagramu nahlížet na výsledný signál různými způsoby.

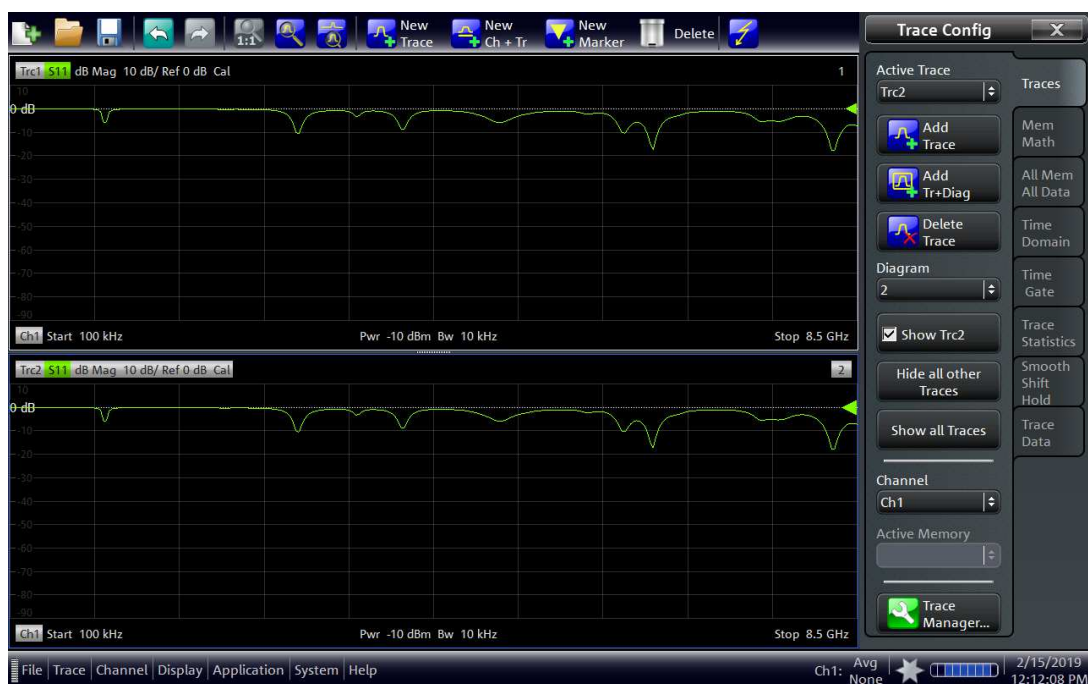
Další měření přidejte následovně (viz obrázek č. 2.14):

- V části **TRACE** stiskněte tlačítko *TRACE CONFIG*. Pro přidání dalšího měření musíte zvolit v podmenu **Traces** možnost *Add Trace*.

Obr. 2.14: Nové měření *Trc2* v jednom diagramu

Vytvoření dalšího diagramu proveďte následujícím způsobem (viz obrázek č. 2.15):

- V části **TRACE** stiskněte tlačítko *TRACE CONFIG*. Pro přidání nového diagramu se stopou musíte zvolit v podmenu **Traces** možnost *Add Tr+Diag*.

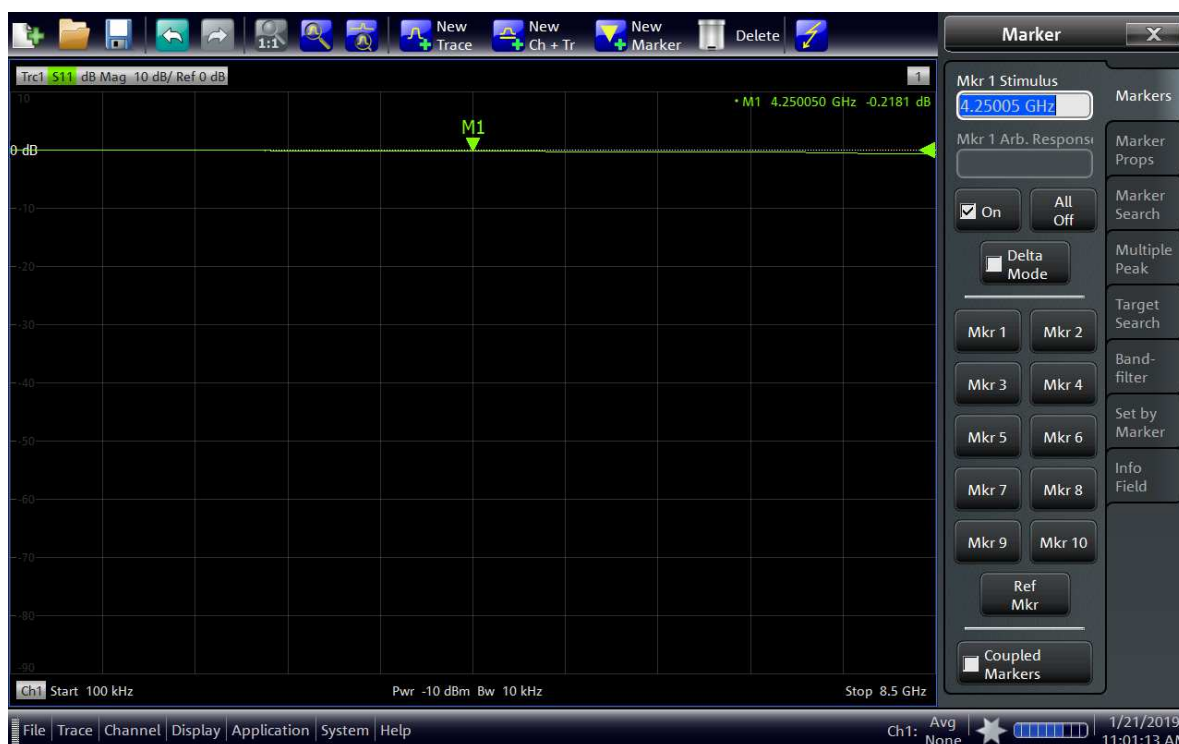
Obr. 2.15: Druhý diagram s novým grafem *Trc2*

2.8 Přidání měřících značek

Měřící značky umožňují lépe a přehledněji charakterizovat část generovaného signálu. Pomocí měřících značek lze jednoduše odečítat data nebo škálovat diagramy.

Vytvoření měřící značky (viz obrázek č. 2.16):

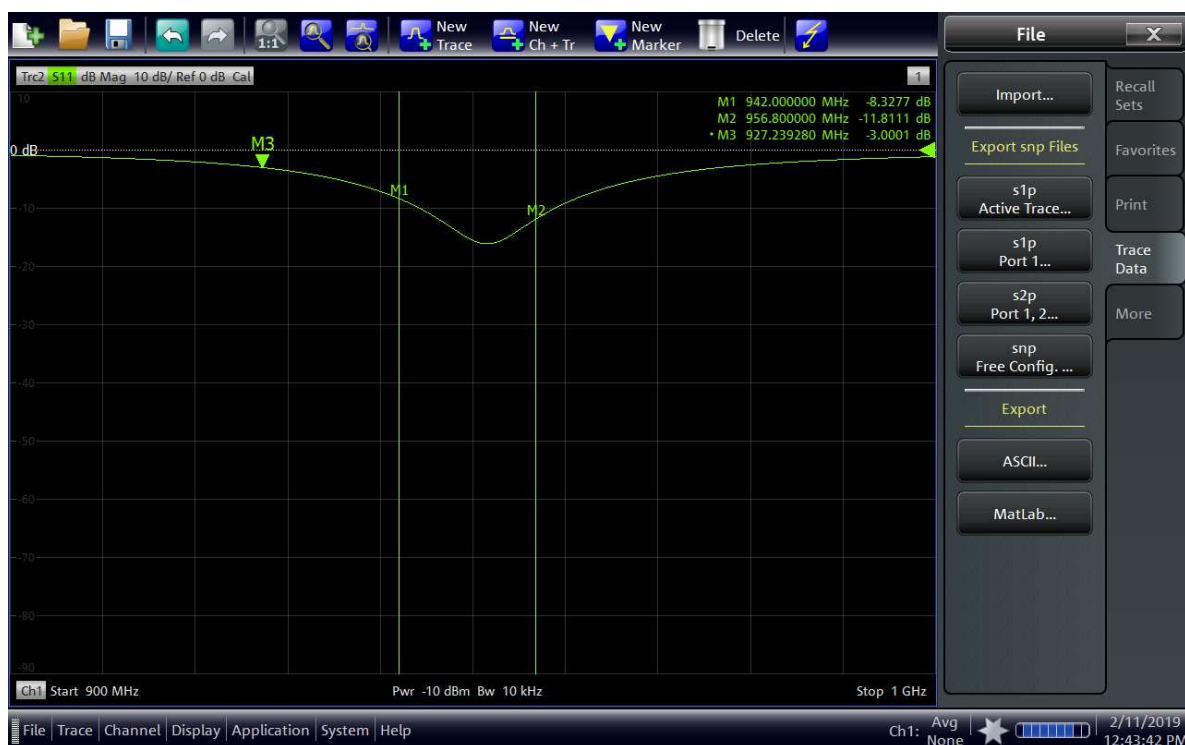
- V horním panelu pracovní plochy klikněte na možnost *New Marker*. Marker se automaticky přidá do aktivního diagramu.
- Pozici měřící značky měníme pomocí bodu, který se nachází pod popiskem markeru.



Obr. 2.16: Podmenu položka **Markers**

2.9 Export měřených dat

Vektorový analyzátor umožňuje výsledná data exportovat do několika typů souborových formátů (.s1p, .s2p, .csv a .dat). Exportovaná data můžete potom dále zpracovávat a graficky zobrazit v různých simulačních programech (například CST Studio, MATLAB nebo Scilab). Pro export dat stisknete na analyzátoru tlačítko *FILE*. Dále se přesunete z položky podmenu **Recall Sets** do položky **Trace Data** (viz obrázek č. 2.17).



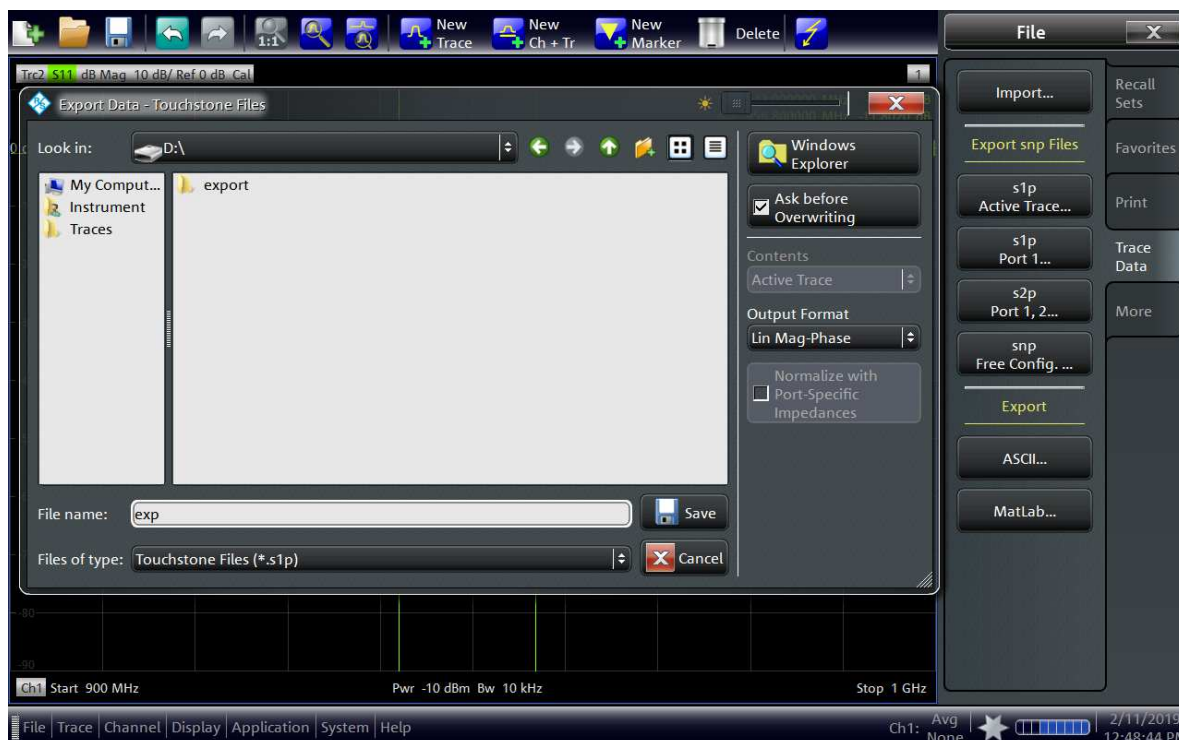
Obr. 2.17: Podmenu položka **Trace Data**

Formáty *s1p* a *s2p* označujeme jako tzv. touchstone formáty. Touchstone formáty jsou typické pro měření S-parametrů. Analyzátor ZND8 má vestavěné dva testovací porty, a proto můžete exportovat pouze ve dvou touchstone formátech (*s1p*, *s2p*). Formát *s1p* lze využít při měření jednoportových rozptylových parametrů (*S11*, *S22*). Formát *s2p* slouží pro export jednoportových i dvouportových rozptylových parametrů (*S11*, *S22*, *S21*, *S12*). Oba formáty mají specifickou hlavičku.

Hlavička formátu se skládá z názvu zařízení, charakteristickou impedancí a časem, kdy byl export proveden. Datová část obsahuje údaje o frekvencích, velikosti rozptylového parametru a úhlech. **CST Studio a Scilab umí naimportovat a pracovat s Touchstone formáty. Analyzátořem můžeme exportovat jeden aktivní graf daného diagramu nebo celý kanál měření.**

Export aktivního měření do formátu *.s1p*:

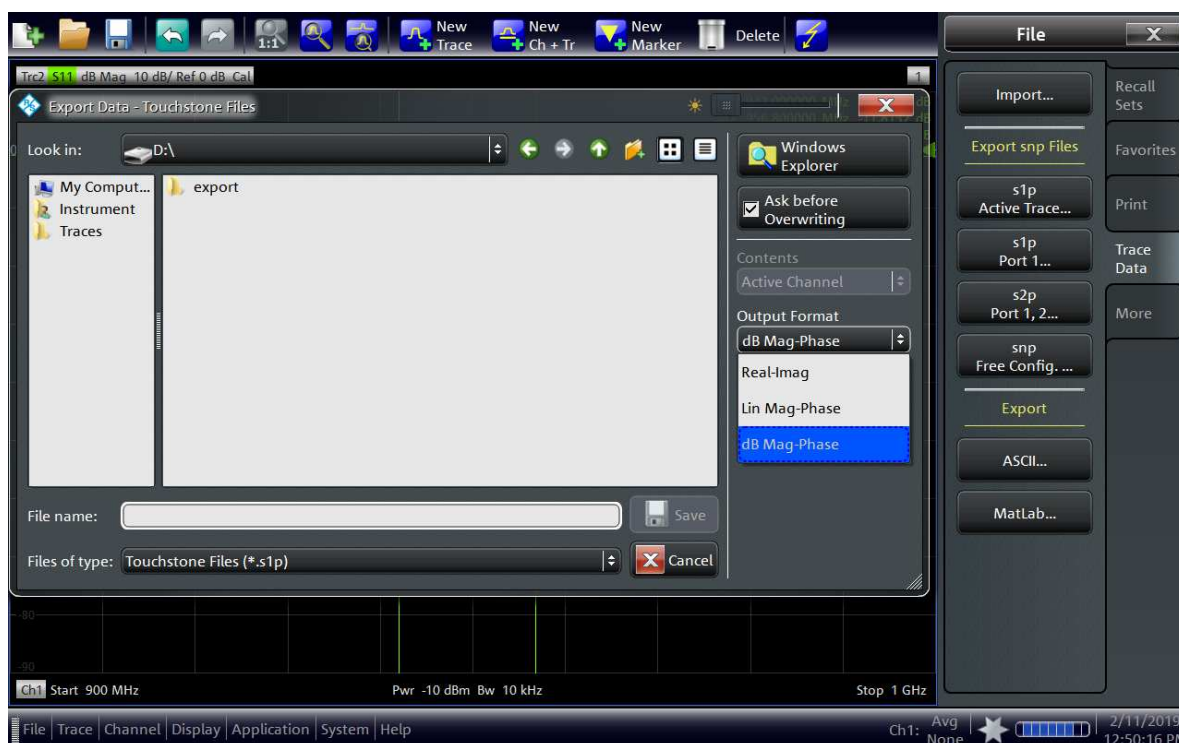
1. V podmenu **Trace Data** stiskněte v části **Export snp Files** položku *s1p Active Trace*.
2. V novém dialogu (viz obrázek č. 2.18) uveďte název souboru a místo, kam chcete data exportovat. V kolonce *Output Format* můžete nastavit způsob zápisu získaných dat.
3. Stiskněte tlačítko *Save*.



Obr. 2.18: Dialogové okno **Export Data – Touchstone Files**

Export celého měřeného kanálu do formátu *.s1p*:

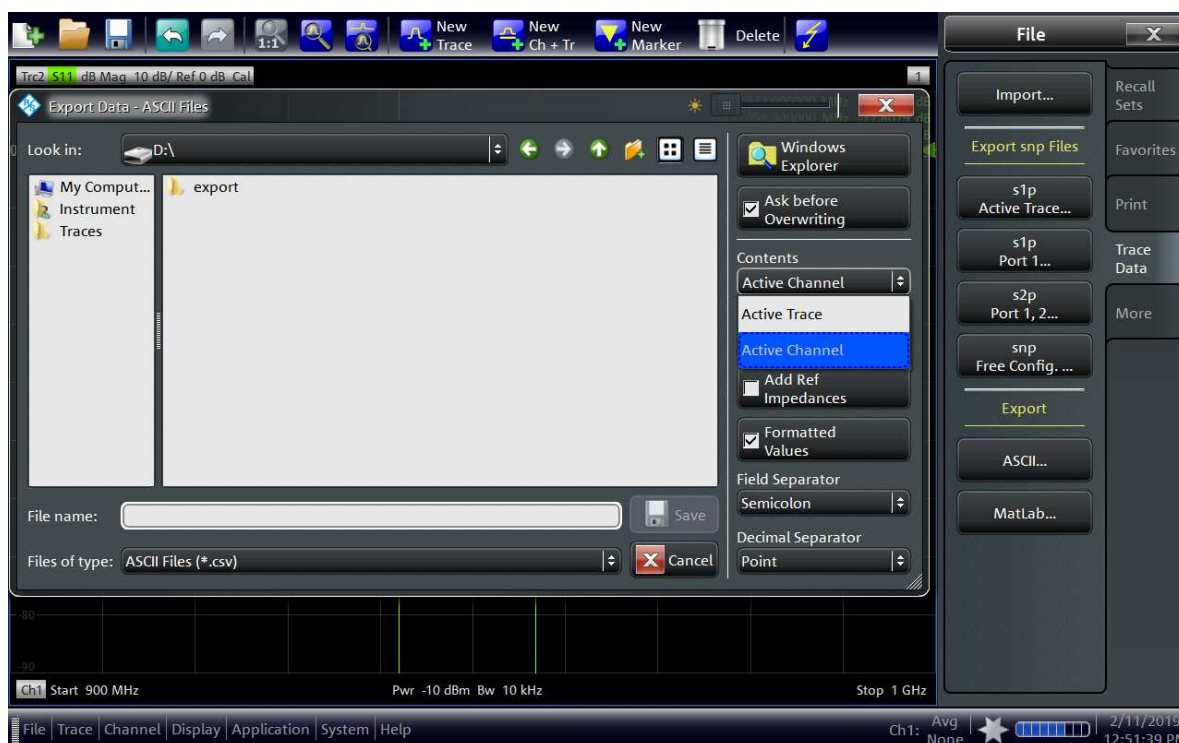
1. V podmenu **Trace Data** klikněte v části **Export snp Files** na položku *s1p Port 1*.
2. Ve vyskakovacím dialogu (viz obrázek č. 2.19) uveďte název souboru a místo, kam chcete data exportovat. V kolonce *Output Format* můžete nastavit způsob zápisu získaných dat.
3. Stiskněte tlačítko *Save*.

Obr. 2.19: Dialogové okno **Export Data – Touchstone Files**

Exportovat do formátu *csv* je užitečné, pokud chcete dále pracovat s naměřenými daty v programu **Microsoft Excel**. Pokud chcete pracovat s naměřenými údaji v **MATLABu**, tak doporučuji exportovat data do formátu *dat*.

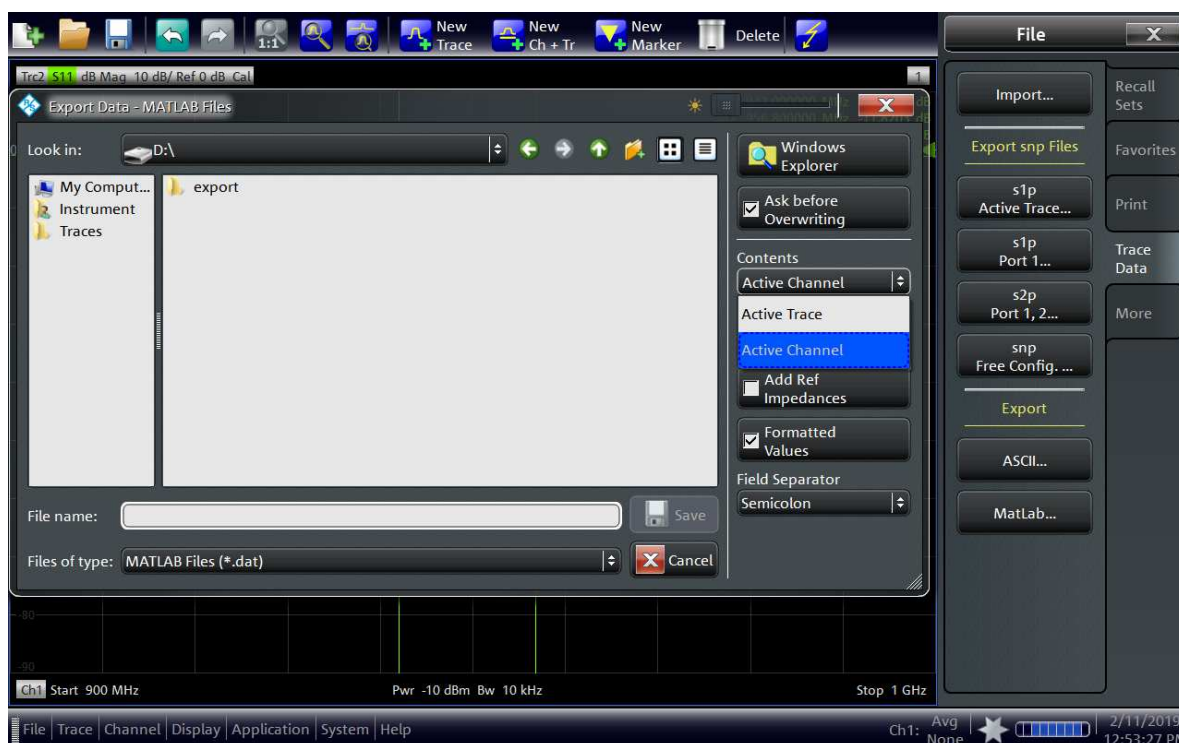
Pro export do formátu *.csv*:

1. V podmenu **Trace Data** stiskněte v části **Export** možnost *ASCII*.
2. Ve vyskakovacím dialogu (viz obrázek č. 2.20) uveďte název souboru a místo, kam chcete data exportovat. V kolonce *Contents* nastavte, jestli chcete uložit celý kanál daného měření nebo pouze jeden aktivní graf. V kolonce *Field Separator* můžete nastavit oddělovač mezi jednotlivými údaji.
3. Stiskněte tlačítko *Save*.

Obr. 2.20: Dialogové okno **Export Data – ASCII Files**

Export do formátu *.dat*:

1. V podmenu **Trace Data** stiskněte v části **Export** možnost *MatLab*.
2. V dialogovém okně (viz obrázek č. 2.21) uveďte název souboru a cestu, kde chcete, aby byl soubor uložen. V kolonce *Contents* nastavte, jestli chcete uložit celý kanál daného měření nebo pouze jeden aktivní graf. V kolonce *Field Separator* můžete nastavit oddělovač mezi jednotlivými údaji.
3. Stiskněte tlačítko *Save*.

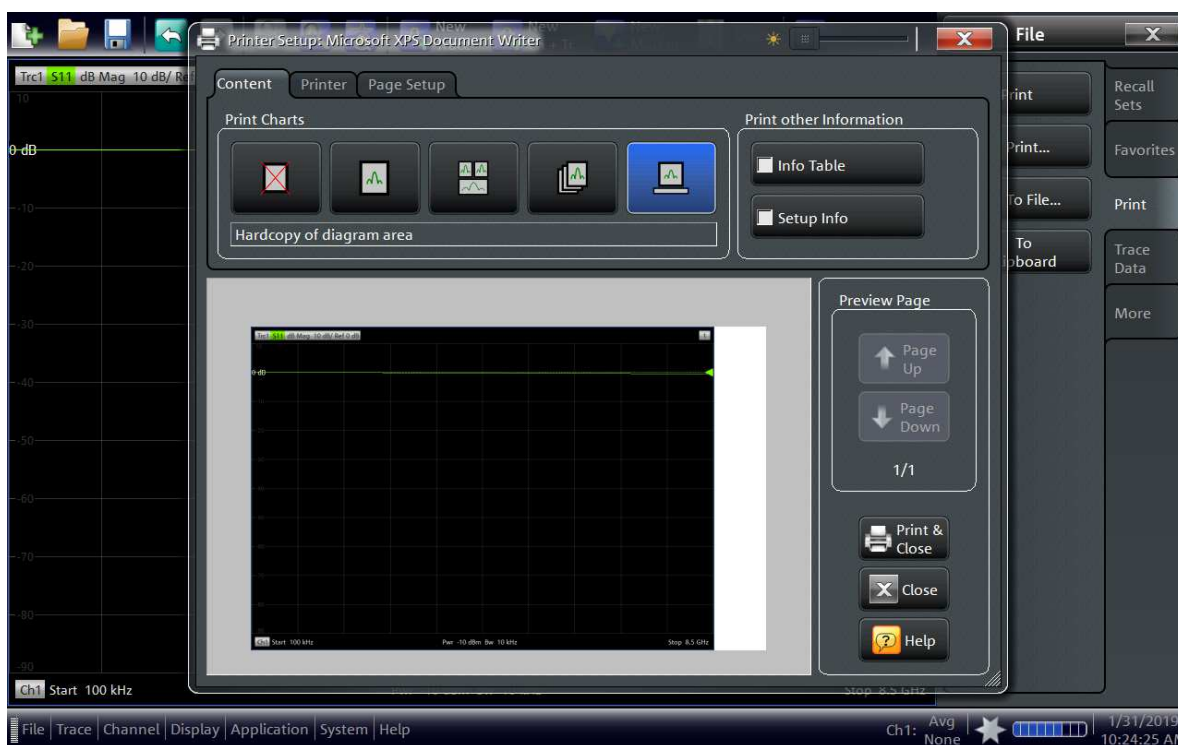
Obr. 2.21: Dialogové okno **Export Data – MATLAB Files**

2.10 Tisk a export diagramů

Analyzátor ZND8 umožňuje uživateli vytisknout a exportovat vytvořené diagramy. Tisknout diagramy lze přímo v softwaru analyzátoru nebo uložením diagramu do formátu .xps. Uživatel taky může pracovní plochu exportovat do základních grafických formátů (.bmp, .jpg, .pdf, .png, .svg).

Tisk a export diagramů provedeme následujícím způsobem:

- Pro export do formátu .xps stiskněte v sekci **SYSTEM** tlačítko *PRINT*. V podmenu **Print** klikněte na možnost *Print*. V dialogovém okně zvolte místo uložení a název souboru. Funkcí *Save* potvrďte export.
- Pomocí funkce *Print...*, která se taky nachází v podmenu **Print**, můžeme tisknout diagramy přímo v softwaru analyzátoru. Funkce *Print...* otevře nové dialogové okno (viz obrázek č. 2.22). V novém dialogovém okně můžeme nastavit samotný tisk. Pod kolonkou *Print Charts* lze určit rozložení diagramů a jejich počet. **Pro rychlý tisk aktuální pracovní plochy klikněte na *Print & Close*.**
- Pokud chcete exportovat diagram do grafického formátu, tak v podmenu **Print** klikněte na možnost *To File*. V novém dialogu vyberte název souboru, grafický formát a místo, kam chcete diagram uložit.

Obr. 2.22: Funkce **Print...**

2.11 Uložení konfigurace analyzátoru

Pro uložení konfigurace analyzátoru stiskněte v sekci **SYSTEM** tlačítko *FILE*. V podmenu **Recall Sets** (viz obrázek č. 2.23) klikněte na možnost *Save*. V novém dialogovém okně stanovte cestu, kde chcete konfiguraci uložit. Dále uveďte název konfigurace. Funkcí *Save* uložte konfiguraci.

Obr. 2.23: Podmenu položka **Recall Sets**

2.12 Načtení konfigurace analyzátoru

Konfiguraci analyzátoru načteme stisknutím tlačítka *FILE*. V podmenu **Recall Sets** (viz obrázek č. 2.23) zvolte funkci *Open Recall*. V dialogovém okně vyhledejte konfiguraci, kterou chcete načíst ve formátě *.znx* a klikněte na *Open*.

Reference

- [1] R&S ZND Vector Network Analyzers: Basic, solid-performance network analysis [online]. Version 1.0. Munich: Rohde&Schwarz, 2018 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/Factsheet_ZND.pdf
- [2] R&S ZND Vector Network Analyzer: Specifications [online]. Version 3.0. Munich: Rohde&Schwarz, 2018 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZND_dat-sw_en_3607-0381-22_v0300.pdf
- [3] R&S ZND Vector Network Analyzer: Basic, solid-performance network analysis [online]. Version 2.0. Munich: Rohde&Schwarz, 2017 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZND_bro_en_3607-0381-12_v0200.pdf
- [4] R&S ZNB Vector Network Analyzer. In: ROHDE&SCHWARZ [online]. Mnichov: ROHDE&SCHWARZ, c2018 [cit. 2018-09-22]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/us/product/znb-productstartpage_63493-11648.html
- [5] R&S ZNC/ZND Vector Network Analyzers: User Manual [online]. Version 36. Munich: Rohde&Schwarz, c2018 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/znc_1/ZNC_ZND_UserManual_en_36.pdf



Katedra
telekomunikační techniky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava

Průvodce pokročilým nastavením vektorového obvodového analyzátoru R&S ZND8

Měření parametrů S11 a S22

Datum: 3.2.2019
Autor: Tomáš Macák
Kontakt: tomas.macak.st@vsb.cz

Obsah

1	Pokročilá konfigurace analyzátoru ZND8	3
1.1	Orientace v kontextovém menu	3
1.2	Nastavení generátoru	3
1.2.1	Regulace vysílaného výkonu	3
1.2.2	Nastavení mezifrekvenčního pásma	4
1.2.3	Průměrování	5
1.2.4	Nastavení typu frekvenčního rozmítání signálu	6
1.3	Nastavení osy Y	8
1.4	Nastavení měřících značek	9
1.4.1	Vytvoření měřící značky	9
1.4.2	Nastavení vlastností měřící značky	10
1.4.3	Značkování globálních a lokálních extrémů signálu	11
1.4.4	Vícenásobné označkování extrémů signálu	12
1.4.5	Nastavení markerů podle výkonové úrovně signálu	13
1.4.6	Nastavení osy X pomocí měřících značek	14
1.5	Import dat	15
1.6	Zobrazení Smithova diagramu	16
1.7	Ukládání kopie měření do paměti analyzátoru	17

Úvod

Následující návod slouží k představení dalších zajímavých nastavení, které dokáží zpřesnit a zefektivnit celé měření. Veškeré nastavení jsou volitelná a v rámci jednoduchých měření není třeba tato nastavení používat.

Součástí návodu je orientace v kontextových menu jednotlivých tlačítek. Uživatel bude seznámen s nastavením generátoru. Čtenář bude umět nastavit vysílaný výkon, mezifrekvenční pásmo a průměrování. Prostor je věnován i nastavení osy Y a to především konfiguraci měřítka mřížky osy Y. Dále budou uživateli představeny zajímavé funkce, které se týkají měřících značek. V neposlední řadě bude čtenáři vysvětlen formát *Smith*, import dat ze simulačních programů a ukládání měření do paměti analyzátoru.

1 Pokročilá konfigurace analyzátoru ZND8

1.1 Orientace v kontextovém menu

Každé tlačítko (např. *Print*) pod určitou sekci (např. *SYSTEM*) poskytuje nějakou funkcionalitu. Při stisku takového tlačítka jste přesměrováni do první položky kontextového menu (podmenu), které je pro každé tlačítko odlišné.

Vektorový analyzátor ZND8 nabízí velké množství možných nastavení. Tato nastavení jsou součástí dalších položek kontextového menu. Na tyto položky není dostatek hardwarových tlačítek, proto je nutné se dostat do těchto položek z první položky podmenu. Existuje nespočet způsobů, jak se mezi položkami kontextového menu pohybovat. Doporučuji si vybrat jeden způsob a držet se ho.

Mezi položkami podmenu přeskakujte následovně:

- Využijte dotykového displeje. Při stisku položky budete na tuto položku přesměrováni.
- Připojte si pomocí USB konektoru počítačovou myš. Mezi položkami se pohybujte kliknutím na položku.
- Můžete využít i hardwarová tlačítka. Při opakovaném stisku stejného tlačítka můžete přeskakovat mezi jednotlivými položkami kontextového menu.

1.2 Nastavení generátoru

Kromě počtu generovaných bodů můžeme u generátoru nastavit i vysílaný výkon, šířku mezifrekvenčního (IF) pásma a průměrování. **Nastavení generátoru musíte vždy provést před kalibrací.**

1.2.1 Regulace vysílaného výkonu

Změnou úrovně vysílaného výkonu dokážeme regulovat výkon, který je veden do jednotlivých testovacích portů. Ve výchozím nastavení je vysílaný výkon roven -10 dBm. Při nastavení úrovně vysílaného výkonu musíte být obezřetní, abyste nepoškodili testovací porty. **Doporučuji výkon regulovat pomocí otočného regulátoru a sekce DATA ENTRY. Všimněte si případných chybových hlášek.**

Hodnotu výkonu nastavte následujícím způsobem (viz obrázek č. 1.1):

- V sekci **CHANNEL** stiskněte tlačítko *Power BW AVG*. V podmenu **Power** nastavte výkonovou úroveň vysílaného signálu funkcí *Power*.

Obr. 1.1: Podmenu položka **Power**

1.2.2 Nastavení mezifrekvenčního pásma

Nastavení mezifrekvenčního pásma umožňuje redukovat šum a nepřesnosti při měření. Čím je mezifrekvenční pásmo menší, tím bude měření přesnější, ale čas rozmítání bude delší. **Minimální hodnota mezifrekvenčního pásma nesmí být menší než 1 Hz nebo větší než 300 kHz kvůli použitých obvodů v analyzátoru.**

Konfiguraci mezifrekvenčního pásma proveďte následovně (viz obrázek č. 1.2):

- Stiskem tlačítka *Power BW AVG* lze nastavit mezifrekvenční pásmo v podmenu **Bandwidth**. IF pásmo můžeme zvolit už z předem daných hodnot, a nebo lze nastavit manuálně.

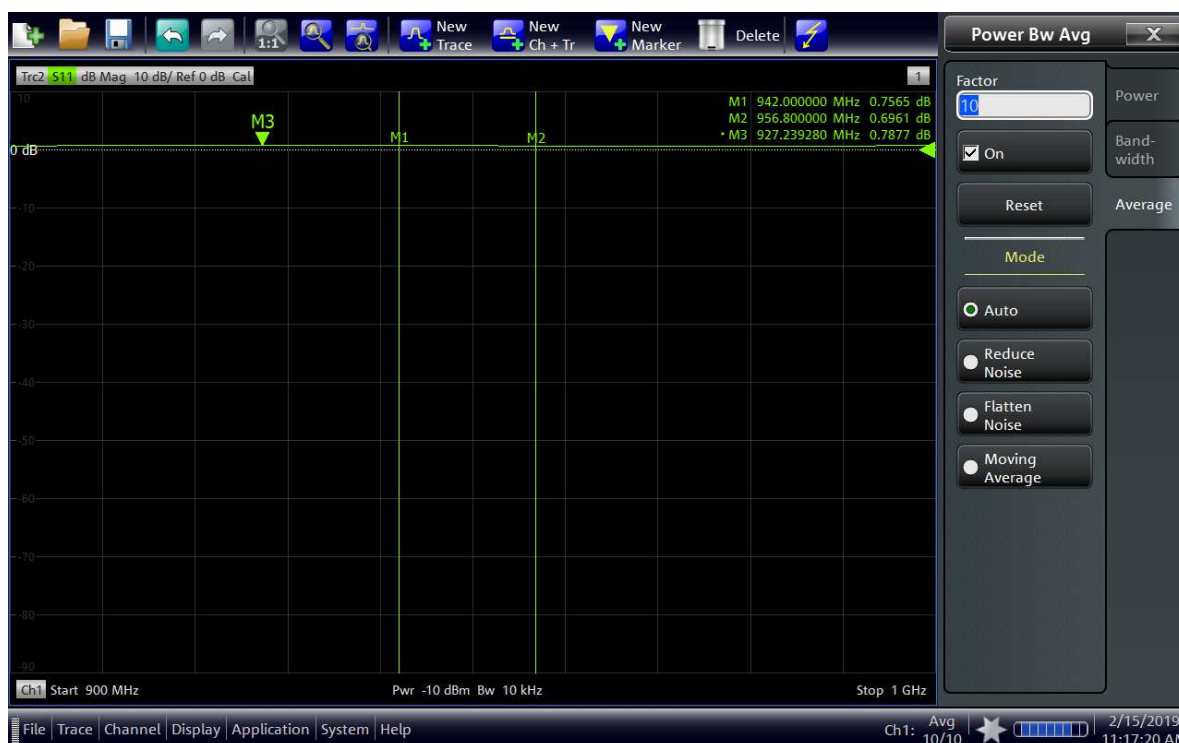
Obr. 1.2: Podmenu položka **Bandwidth**

1.2.3 Průměrování

Na redukování šumu a nepřesností se především v praxi využívá průměrování. Hodnota faktoru udává počet provedených měření, ze kterých bude po zprůměrování získán jeden měřený bod. Vyšší hodnota faktoru umožňuje větší přesnost za cenu pomalejšího zpracování výsledků.

Nastavení faktoru (viz obrázek č. 1.3):

- Stisknutím tlačítka *Power BW AVG* můžete v podmenu **Average** nastavit průměrování jednotlivých měření. V kolonce *Factor* stanovte pomocí hardwarové klávesnice počet měření, které jsou zprůměrovány do jednoho měřicího bodu. Dále pod kolonkou *Factor* zaškrtněte možnost *On* tak, aby bylo vlastní průměrování povoleno.

Obr. 1.3: Podmenu položka **Average**

1.2.4 Nastavení typu frekvenčního rozmítání signálu

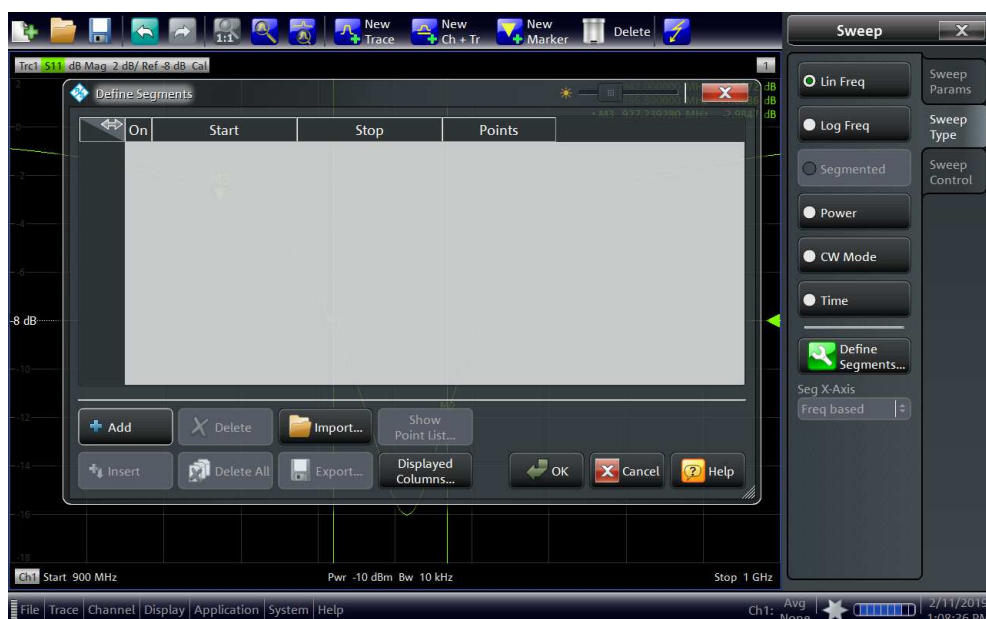
Vektorový obvodový analyzátor rozmítá frekvenci (osu X) ve zvoleném kmitočtovém rozmezí (pro analyzátor ZND8 100 kHz až 8.5 GHz). Neměříme tedy pouze jeden kmitočet, ale námi zvolené kmitočtové pásmo. Rozmítat kmitočet lze hned několika způsoby. V této části uvedu pouze základní typy rozmítání. Pro konfiguraci rozmítání stiskněte tlačítko *SWEEP* v části **CHANNEL**. Typ rozmítání nastavujte v podmenu **Sweep Type**.

Typy rozmítání kmitočtu:

- *Lin Freq* slouží k lineárnímu rozmítání frekvence. Analyzátor ZND8 používá *Lin Freq* jako **výchozí nastavení rozmítání**.
- *Log Freq* bude rozmítat osu X logaritmicky. Lze nastavit kliknutím na tuto možnost.
- *Segmented* umožňuje nastavit použité frekvenční rozmezí a zároveň toto rozmezí rozdělit na několik frekvenčních segmentů. V každém frekvenčním segmentu si uživatel může zvolit počet generovaných bodů. Ve výsledku tak může zefektivnit a zrychlit svou práci při měření, protože nemusí nastavovat stejný počet generovaných bodů v celém frekvenčním pásmu, ale pouze v důležitých segmentech. **Pro nastavení segmentovaného rozmítání je nutné nejdříve nastavit jednotlivé segmenty.**

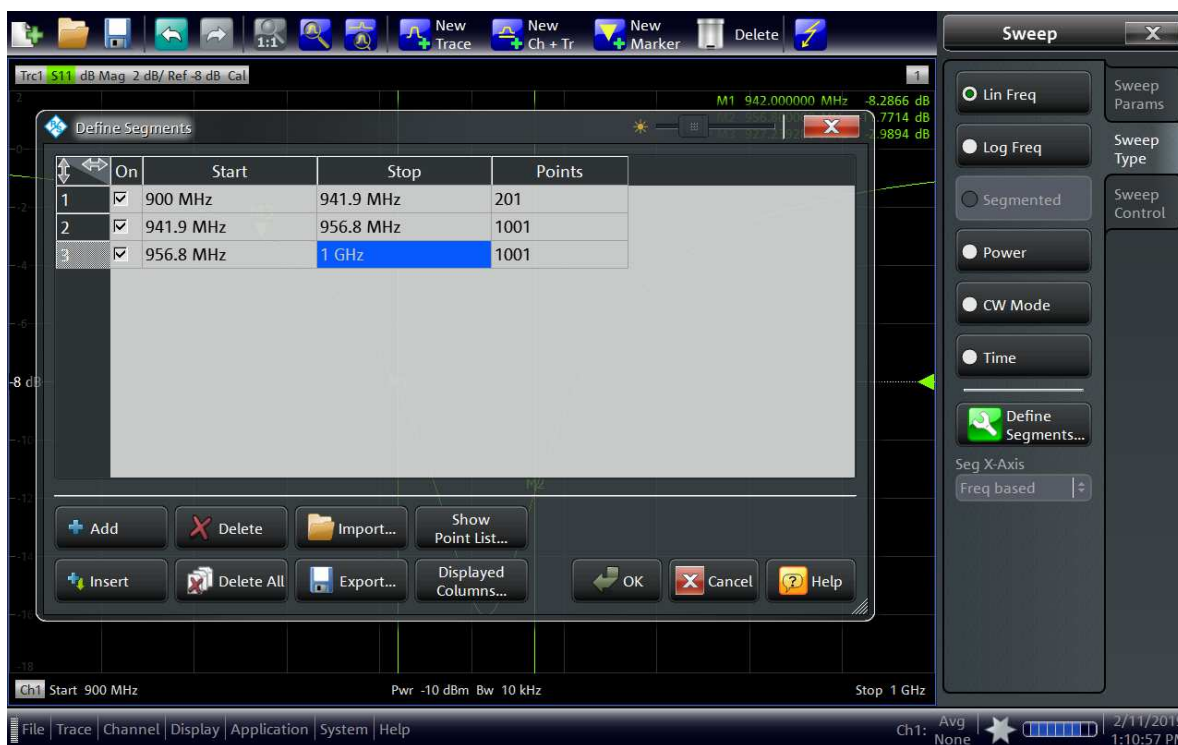
Nastavení rozmítání typu *Segmented*:

1. V podmenu **Sweep Type** stiskněte tlačítko *Define Segments*.
2. V dialogovém okně (viz obrázek č. 1.4) stiskněte možnost *Add*.



Obr. 1.4: Dialogové okno Define Segments

3. Stiskem *Add* jste přidali nový řádek (viz obrázek č. 1.5). První sloupec *On* povolí použití segmentu. Do sloupce *Start* запиšte počáteční kmitočet a do sloupce *Stop* kmitočet koncový. V posledním sloupci stanovte počet generovaných bodů v daném segmentu. Stiskněte tlačítko *OK*. Typ rozmítání se automaticky změní na *Segmented*.



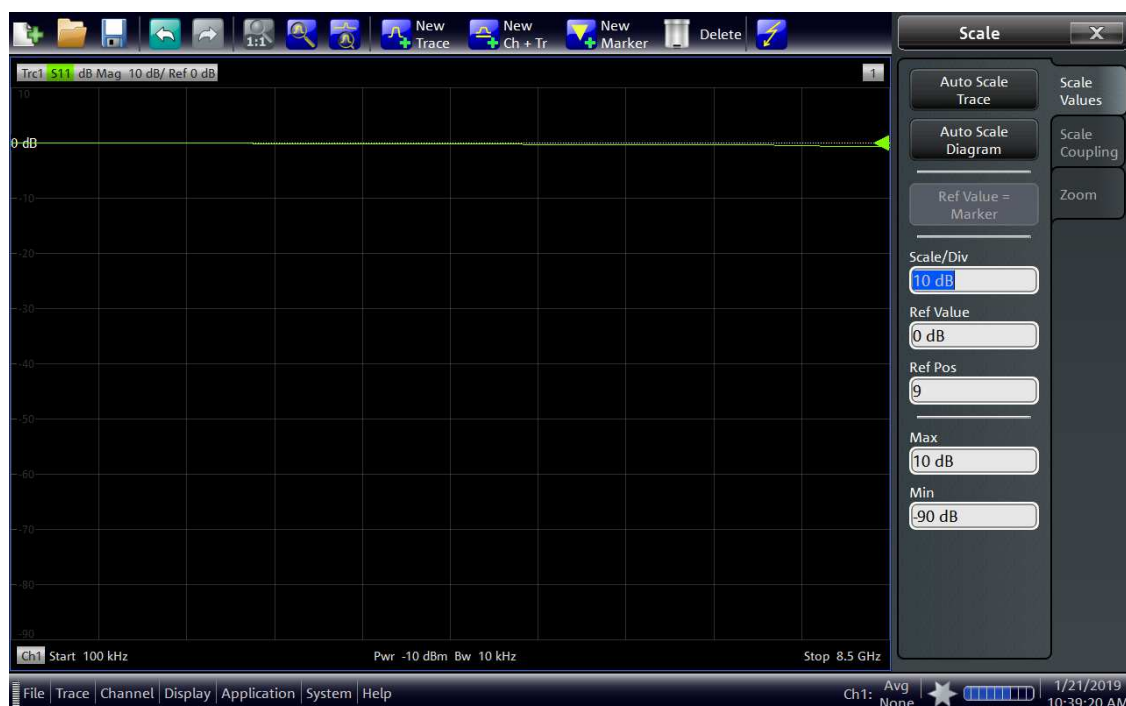
Obr. 1.5: Dialogové okno Define Segments

1.3 Nastavení osy Y

Nastavení měřítka osy Y není povinné, ale správné nastavení měřítka usnadňuje výsledné zobrazení samotného signálu. Měřítka mřížky lze nastavit i v průběhu měření. Neovlivní tedy přesnost kalibrace.

Nastavit osu Y můžete následovně (viz obrázek č. 1.6):

- Pro nastavení maximální zobrazitelné hodnoty osy Y stiskněte v sekci **TRACE** tlačítko **SCALE**. V podmenu **Scale Values** запиšte hodnotu do kolonky **MAX**.
- Pro nastavení minimální zobrazitelné hodnoty osy Y запиšte v podmenu **Scale Values** hodnotu do kolonky **MIN**.
- Referenční úroveň (na displeji je reprezentována tučnou vodorovnou čarou) můžete změnit v podmenu **Scale Values** v kolonce *Ref Value*. Výchozí hodnota počátku je 0 dB.
- Uživatel může nastavit pozici referenční čáry pomocí kolonky *Ref Pos*. **Změněná hodnota Ref Pos neovlivní zvolenou Ref Value**. *Ref Pos* nabývá hodnot 0 až 10. Hodnota 0 posune referenční čáru na nejspodnější část diagramu. Hodnota 10 přesune referenční čáru na nejvrchnější část diagramu.
- Pro nastavení měřítka mřížky osy Y stanovte v podmenu **Scale Values** hodnotu do kolonky *Scale/Div*.
- Pokud chcete provést nastavení mřížky osy Y automaticky podle zobrazeného signálu, tak doporučuji v průběhu měření požadovaného zařízení stisknout v části **TRACE** tlačítko **SCALE** a v podmenu **Scale Values** kliknout na možnost *Auto Scale Trace*.



Obr. 1.6: Podmenu položka **Scale Values**

1.4 Nastavení měřících značek

Analyzátor ZND8 disponuje pokročilými funkcemi měřících značek. Můžeme například nalézt globální minimum a maximum v zobrazeném signálu. Analyzátor nabízí několik typů vyhledávacích funkcí, které umožňují zrychlit odečítání hodnot. Veškerá nastavení budou probíhat v kontextovém menu tlačítka *MARKER*, které naleznete v sekci **TRACE**.

1.4.1 Vytvoření měřící značky

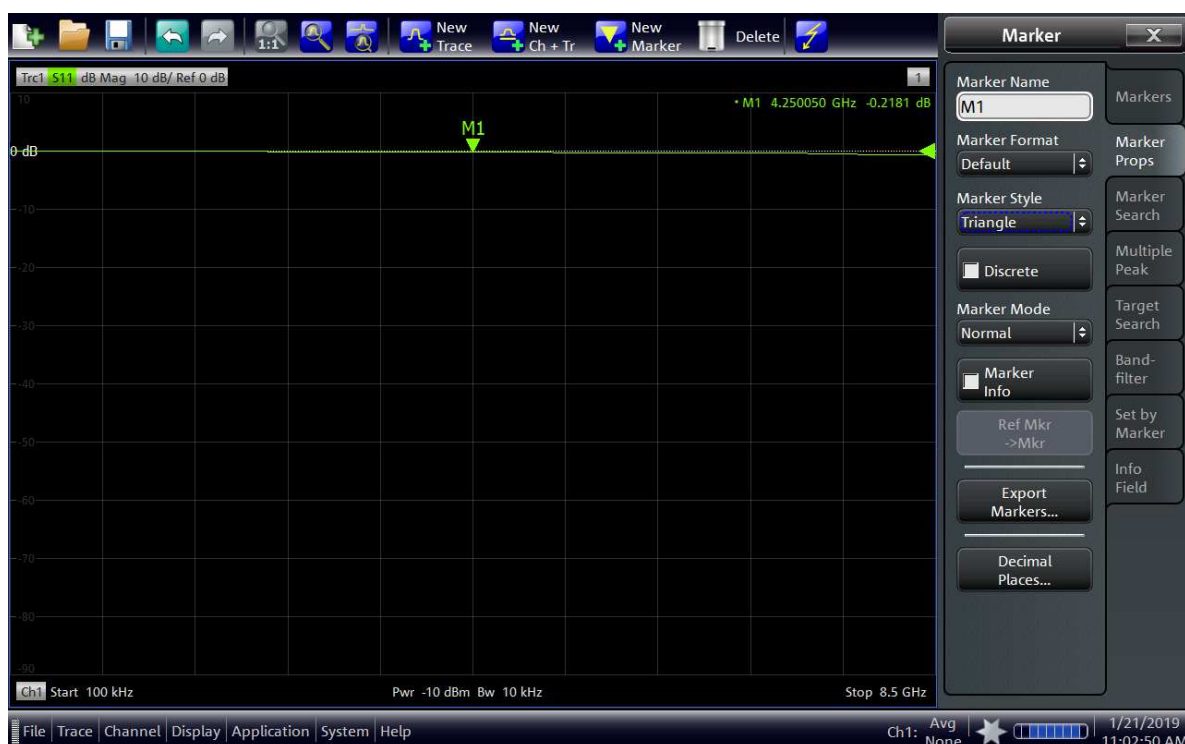
- V podmenu **Markers** můžete vytvořit až 10 měřících značek. Například marker *M1* vytvoříte stiskem položky *Mkr 1*.
- Markeru *M1* můžeme změnit i polohu (kmitočet). V podmenu **Markers** zapište do kolonky *Mkr 1 Stimulus* požadovaný kmitočet (viz obrázek č. 1.7).



Obr. 1.7: Podmenu položka **Markers**

1.4.2 Nastavení vlastností měřící značky

- V podmenu **Marker Props** (viz obrázek č. 1.8) můžete změnit popis značky v kolonce *Marker Name*.
- Markeru lze nastavit odlišný formát od zobrazovaného signálu pomocí výběrového menu v kolonce *Marker Format*.
- Měřící značka může nabývat různých tvarů. Mezi používané tvary patří obrácený trojúhelník, obdélník nebo přímka (pro limitní testy). Tvar markeru stanovte v kolonce *Marker Style*.

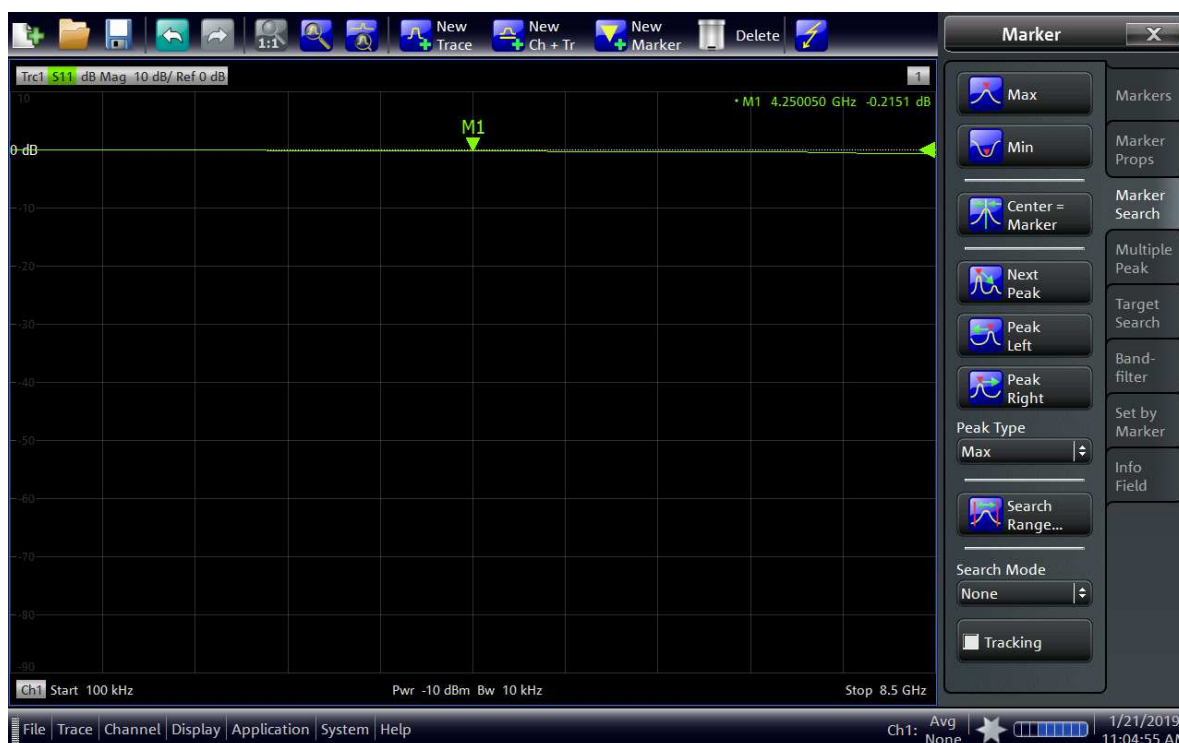


Obr. 1.8: Podmenu položka **Marker Props**

1.4.3 Značkování globálních a lokálních extrémů signálu

Pro značkování extrémů nemusíte mít předem vytvořenou měřicí značku, jelikož se sama automaticky vytvoří. Pokud už máte vytvořený marker a chcete ho jen přemístit na extrém signálu, tak musíte na marker nejdříve kliknout (zapnout aktivní režim). Pro nastavení požadovaného lokálního extrému mějte vždy nastavený v podmenu **Marker Search** správný *Peak Type*. Pro nastavení globálních extrémů není nutné *Peak Type* stanovovat.

- Pro přemístění markeru na místo globálního maxima klikněte v podmenu **Marker Search** (viz obrázek č. 1.9) na položku *Max*.
- Přemístění markeru na místo globálního minima provedete pomocí položky *Min*.
- Pro nastavení lokálního extrému zvolte položku *Next Peak*. Pokud chcete lokální extrém hledat na levé straně od aktivního markeru, tak klikněte na možnost *Peak Left*. Pokud chcete hledat lokální extrém na pravé straně od aktivní měřicí značky, tak stiskněte položku *Peak Right*.
- Analyzátor ZND8 umožňuje nastavit vlastní kmitočtové rozmezí, ve kterém se mají hledat lokální extrémy. Stiskněte možnost *Search Range...* a nadefinujte ve vyskakovacím okně vlastní rozmezí.
- Pokud chcete posunout měřicí značku do středu frekvenčního spektra, tak klikněte na položku *Center = Marker*.



Obr. 1.9: Podmenu položka **Marker Search**

1.4.4 Vícenásobné označování extrémů signálu

Analyzátor ZND8 umožňuje automaticky najít až 10 extrémů signálu a přiřadit nalezeným extrémům nové měřicí značky. Nastavení provádějte v podmenu **Multiple Peak** (viz obrázek č. 1.10).

- Pomocí *Eval Range...* nastavte v novém dialogovém okně frekvenční rozmezí, ve kterém chcete hledat jednotlivé extrémy.
- Pro automatické hledání maximálních hodnot a přiřazení markerů klikněte na možnost *Max*.
- Pro hledání minimálních hodnot a přiřazení markerů stiskněte položku *Min*.



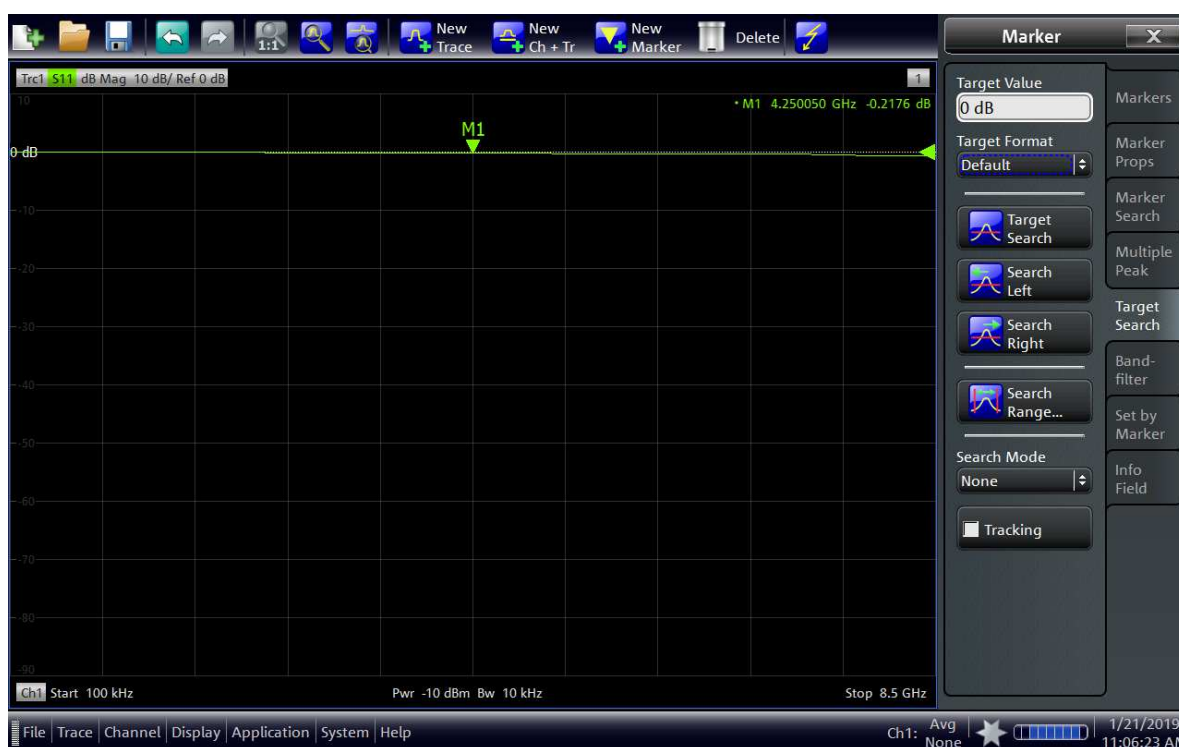
Obr. 1.10: Podmenu položka **Multiple Peak**

1.4.5 Nastavení markerů podle výkonové úrovně signálu

Kromě extrémů signálu dovoluje analyzátor přesouvat měřící značky i podle výkonové úrovně zobrazovaného signálu. Oproti značení extrémů je nutné mít už předem vytvořené markery. Pro přesouvání markeru je nutné, aby byl marker aktivní. Veškeré nastavení markerů, na základě výkonové úrovně, probíhá v podmenu **Target Search** (viz obrázek č. 1.11).

Ukázka nastavení aktivního markeru podle výkonové úrovně:

1. Nastavte výkonovou úroveň, na které chcete marker umístit pomocí funkce *Target Value*.
2. Stanovte kmitočtové rozmezí, na kterém se určitá výkonová úroveň bude hledat. V položce *Search Range...* stanovte počáteční a koncovou frekvenci.
3. Volitelně můžete specifikovat, zda má analyzátor vyhledat výkonovou úroveň zleva nebo zprava od aktivního markeru pomocí funkcí *Search Left* a *Search Right*.
4. Pro vyhledání výkonové úrovně a umístění markeru použijte funkci *Target Search*.



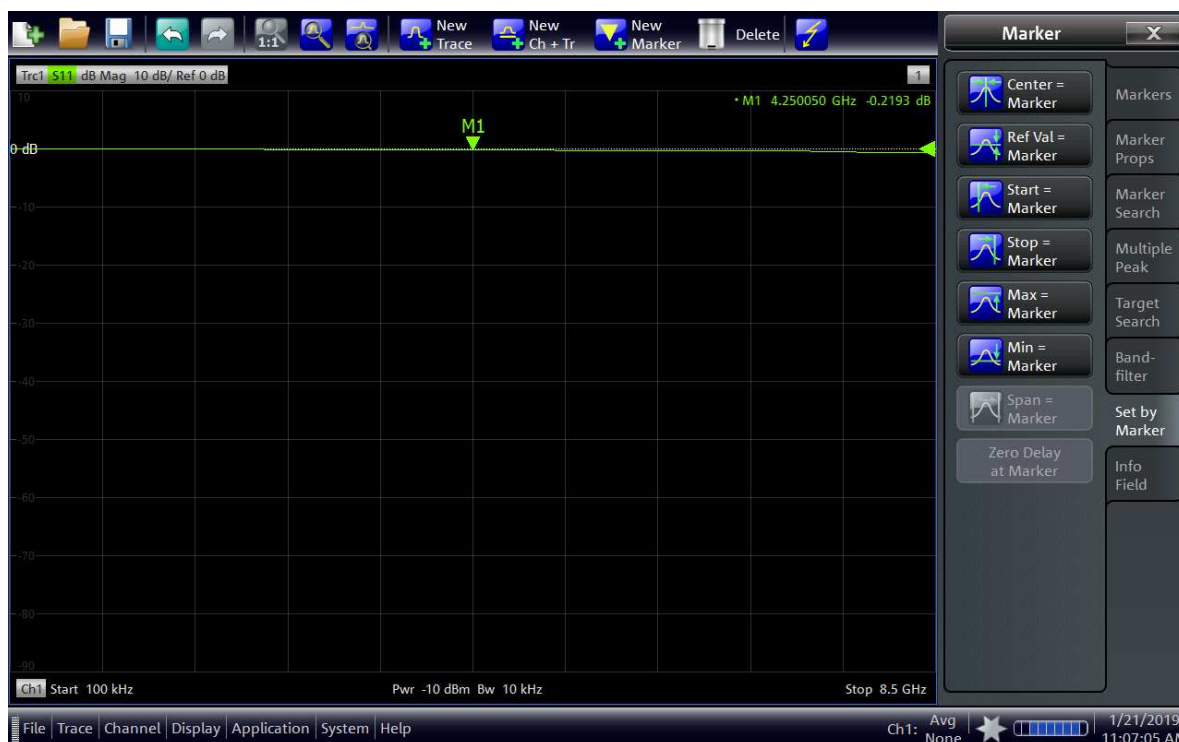
Obr. 1.11: Podmenu položka **Target Search**

1.4.6 Nastavení osy X pomocí měřících značek

Měřící značky slouží taky jako alternativa ke škálování pracovní plochy. Pomocí měřících značek lze definovat osu X a osu Y. Dále lze posouvat pracovní plochu vůči minimu, maximu nebo referenční hodnoty. V praxi máme často potřebu nastavit frekvenční rozmezí pomocí markerů. Nastavení proveďte v podmenu **Set by Marker** (viz obrázek č. 1.12).

Nastavení kmitočtového rozmezí pomocí měřících značek:

1. Vytvořte dvě nové měřící značky a umístěte je na ose X. První marker přesuňte na místo, kde chcete, aby osa X začínala. Druhý marker posuňte na místo, kde chcete, aby osa X končila.
2. Označte první marker a v podmenu **Set by Marker** klikněte na možnost *Start = Marker* pro nastavení počáteční frekvence.
3. Potom uveďte druhý marker do aktivního režimu a v podmenu **Set by Marker** stiskněte položku *Stop = Marker* pro nastavení koncové frekvence.



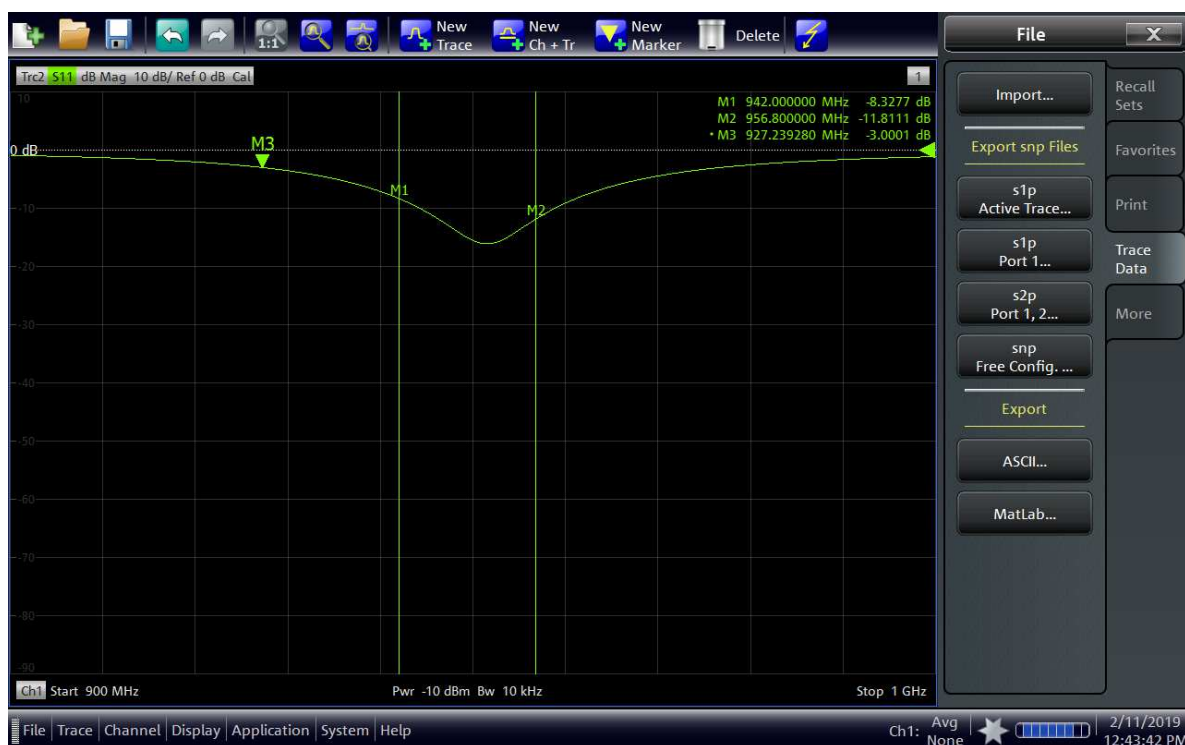
Obr. 1.12: Podmenu položka **Set by Marker**

1.5 Import dat

Analyzátor ZND8 umožňuje uživateli importovat data ve formátu .csv, .s*p (obecně touchstone formát), .dat. Importovaná data se potom zobrazí na aktivním diagramu.

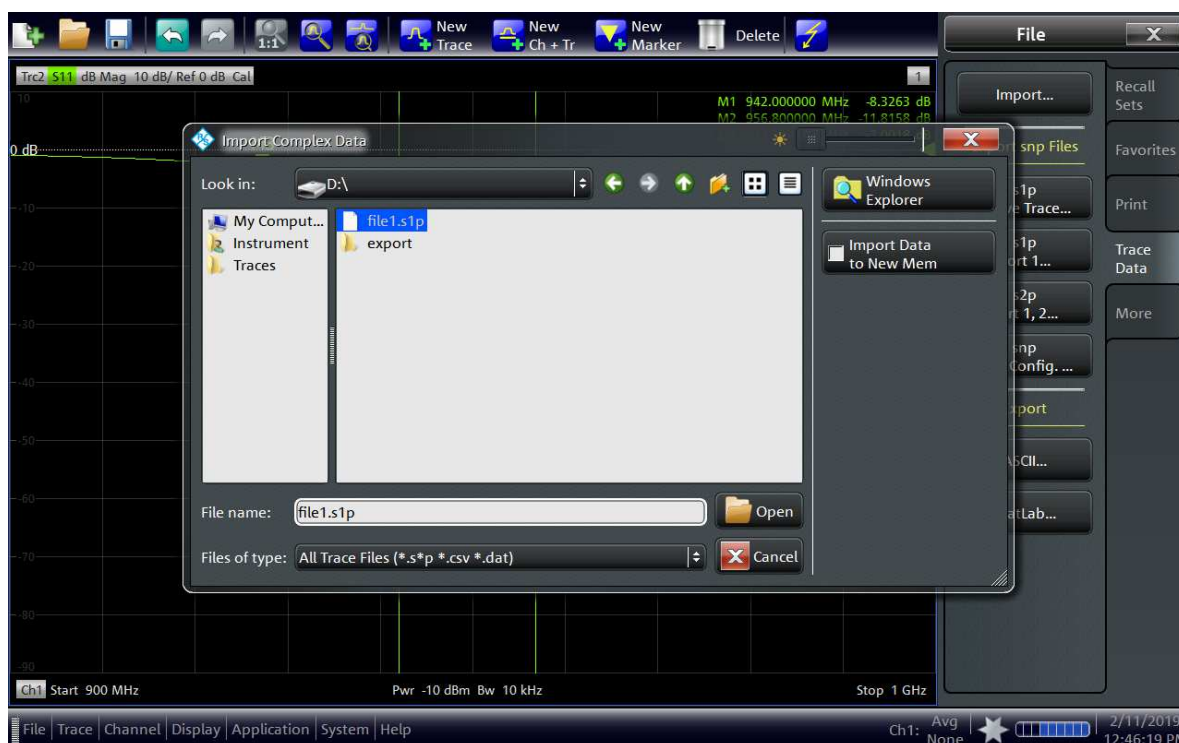
Importování dat v analyzátoru ZND8:

1. Pro import dat stiskněte na analyzátoru tlačítko *FILE*. Přesuňte se v kontextovém menu na podmenu **Trace Data** (viz obrázek č. 1.13).



Obr. 1.13: Podmenu položka **Trace Data**

2. Klikněte na možnost *Import*. V dialogovém okně (viz obrázek č. 1.14) zvolte cestu k importovanému souboru a stiskněte tlačítko *Open*.

Obr. 1.14: Dialogové okno **Import Complex Data**

1.6 Zobrazení Smithova diagramu

Smithův diagram je kruhový a nelineární diagram, který slouží k zobrazení komplexní impedance a činitele odrazu. Vektorový analyzátor ZND8 dokáže měřit velikost i fázi, a proto při měření jednoportových S-parametrů obdržíme vždy data s reálnou a imaginární složkou.

Analyzátor ZND8 umožňuje změřená data mapovat a graficky zobrazit pomocí Smithova diagramu. Smithův diagram se především používá k impedančnímu přizpůsobení elektrických obvodů a grafickému zobrazení komplexních hodnot impedance. Smithův diagram lze také použít jako kontrolu správně provedené kalibrace. Pro kontrolu kalibrace můžete použít jakýkoliv základní kalibrační standard. Kalibrační standard musí být předem otestovaný kvůli přesnosti kontroly.

Nastavení formátu *Smith* v analyzátoru ZND8:

- Stiskněte tlačítko *FORMAT* v sekci **TRACE**. V podmenu **Format** zvolte možnost *Smith*.

Kontrola kalibrace pomocí Smithova diagramu a kalibračního standardu *Match*:

1. Po kalibraci přístroje nastavte formát *Smith*.
2. Připojte ke kalibrované referenční rovině kalibrační standard *Match*.
3. Pokud je výsledek zobrazen přesně ve středu Smithova diagramu, tak obvod odpovídá vlastnostem kalibračního standardu *Match*. Kalibrace byla tedy provedena správně.

1.7 Ukládání kopie měření do paměti analyzátoru

Analyzátor ZND8 dovoluje ukládat statické kopie měření do paměti analyzátoru. Uživatel si tak může uložit dosavadní výsledky měření. Tato funkce je žádoucí, pokud je třeba porovnat dvě zařízení na podobném kmitočtovém rozsahu a nastavení. Uživatel uloží výsledky prvního měření do paměti analyzátoru. Dále tyto výsledky z paměti načte a zapojí druhé zařízení. Takhle může uživatel v rámci jednoho diagramu srovnat dva grafy dvou různých zařízení.

Ukládání kopií do paměti přístroje má svá specifická pravidla:

- Do paměti ukládáme pouze **kopii** daného měření (původního grafu). V kopii nelze nic nastavovat (lze pouze přidat matematické operace). Slouží pouze k srovnávání.
- Vytvořená kopie se váže na data původního grafu (**trace** z kterého byla vytvořena kopie). Pokud v původním grafu změníme zobrazení formátu na *SWR*, pak i kopie bude ukazovat parametr *SWR*. Stejné pravidlo platí i při nastavení osy Y. Kopie se automaticky zobrazí ve stejném diagramu jako původní graf.
- Při uložení kopie se vytvoří nový graf pro data uložená v paměti zařízení. Název uloženého grafu je ve tvaru Mem<jedinečné pořadové číslo grafu v paměti>[<číslo původního grafu>]. Další graf uložený v paměti vycházející z grafu 7 (trace 7) bude uložen pod názvem Mem2[Trc7].
- Analyzátor umožňuje ukládat grafy do paměti před i po použití matematických operací na data.
- Při změně typu frekvenčního rozmítání smažete všechny uložené grafy v paměti na daném kanálu.

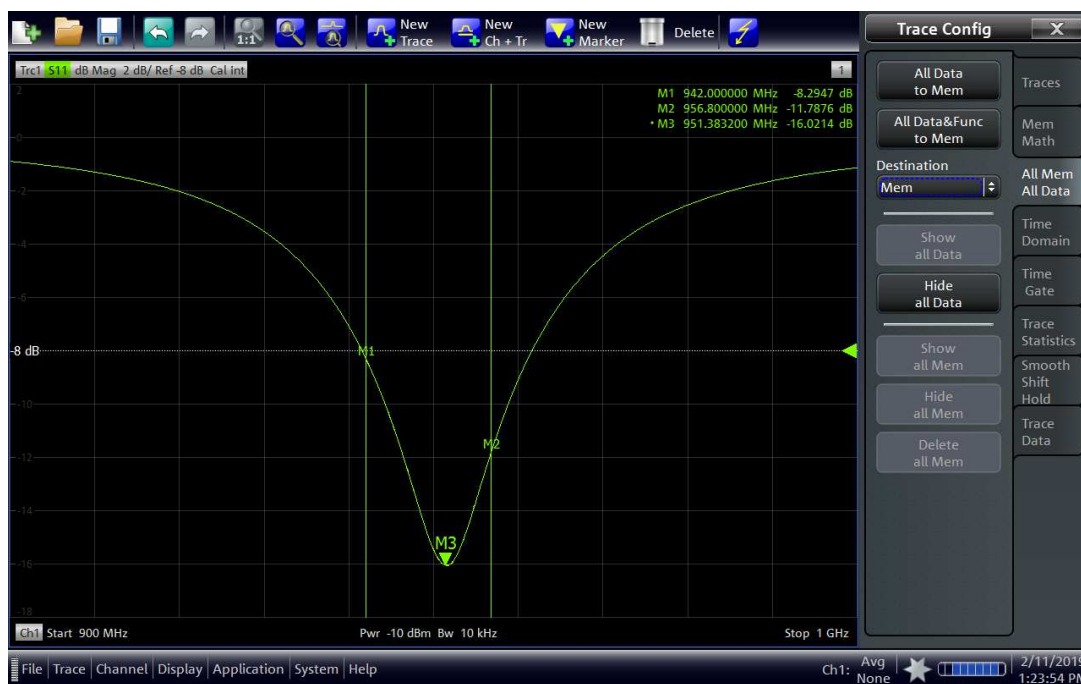
Vytvoření kopie označeného grafu v analyzátoru ZND8:

- Stiskněte tlačítko *TRACE CONFIG* v části **TRACE**. V podmenu **Mem Math** spravujeme nové kopie měření.
- Pro vytvoření kopie, bez použitých matematických funkcí, stiskněte možnost *Data to New Mem*.
- Pro uložení dat, které využívají matematické funkce (lze definovat v *Define Math*), klikněte na možnost *Data & Func to New Mem* (viz obrázek č. 1.15).
- V kolonce *Destination* můžete nastavit, zda chcete v paměti vytvořit nový graf (*New Mem*) nebo přepsat již uložený graf.
- Možnosti *Show Mem* a *Show Trc* umožňují uživateli zobrazit nebo schovat uložený a původní graf (trace) v aktivním diagramu.

Obr. 1.15: Dvě kopie grafu **Trc2**

Uložení všech grafů do paměti v rámci kanálu:

- Stiskněte tlačítko *TRACE CONFIG* v části **TRACE**. Pomocí podmenu **All Mem All Data** (viz obrázek č. 1.16) ukládáme všechny kopie daného kanálu.

Obr. 1.16: Položka podmenu *All Mem All Data*

- Pro uložení všech grafů, bez použití matematických funkcí, klikněte na tlačítko *All Data to Mem*.
- Pro vytvoření kopií grafů, u kterých můžeme definovat matematické funkce, stiskněte položku *All Data & Func to Mem*. Matematické funkce lze definovat v podmenu **Mem Math** v položce *Define Math*.
- V kolonce *Destination* můžete nastavit, zda chcete uložit vytvořené grafy do paměti (*Mem*) nebo přepsat již uložené grafy.
- Možnosti *Show all Data* a *Hide all Data* umožňují uživateli zobrazit nebo schovat veškeré původní grafy (traces). **Pomocí funkce *Show all Data* lze zobrazit všechny původní grafy i grafy vyvolané z paměti přístroje.**
- *Show all Mem*, *Hide all Mem* a *Delete all Mem* jsou položky, které spravují všechny vytvořené grafy v paměti. Na základě těchto položek můžeme všechny vytvořené kopie zobrazit, schovat nebo smazat.

Reference

- [1] R&S ZNC/ZND Vector Network Analyzers: User Manual [online]. Version 36. Munich: Rohde&Schwarz, c2018 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuels/gb_1/z/znc_1/ZNC_ZND_UserManual_en_36.pdf



Měření rozptylového parametru S_{11} vybrané antény

Datum: 22.02.2019
Autor: Tomáš Macák
Kontakt: tomas.macak.st@vsb.cz
Předmět: Radiokomunikační technika 1

Zadání:

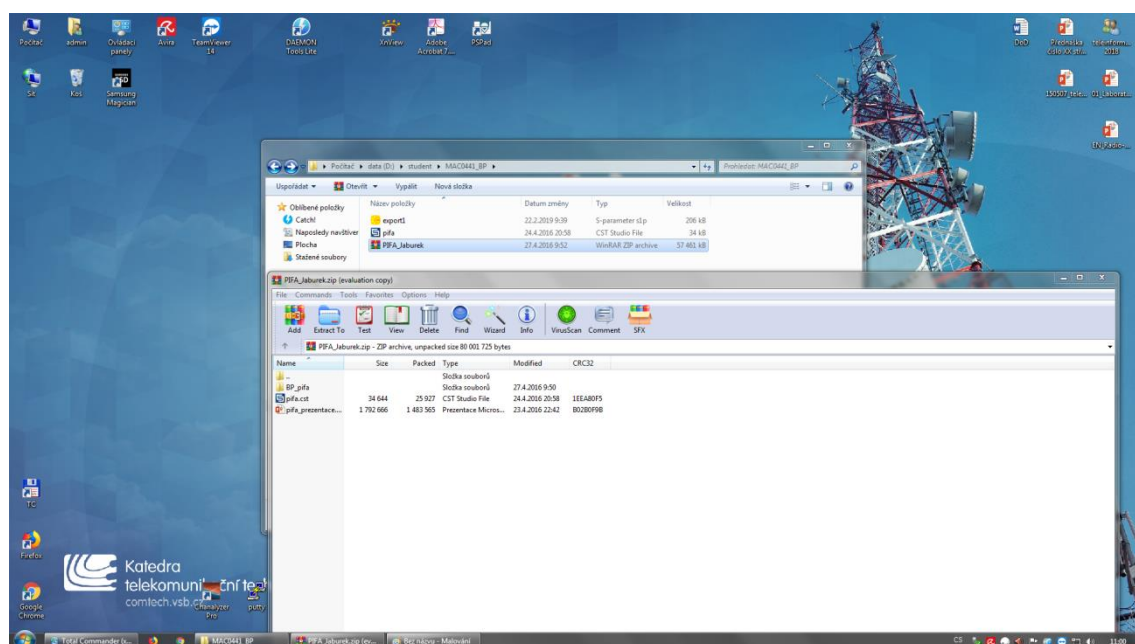
- Pomocí vektorového analyzátoru R&S ZND8 změřte vstupní koeficient odrazu (parametr S_{11}), poměr stojatých vln (SWR) a vstupní impedanci vybrané antény.
- Naměřené hodnoty parametru S_{11} srovnajte se simulací dané antény provedenou v programu CST Studio.

Měřicí přístroje:

- Vektorový obvodový analyzátor R&S ZND8
- Kalibrační klíčenka ZV-Z135 50 Ω , typu 3.5 mm female
- Kalibrační kabel s konektorem typu 3.5 mm male
- Vzorek antény
- Software CST Studio
- USB flash disk

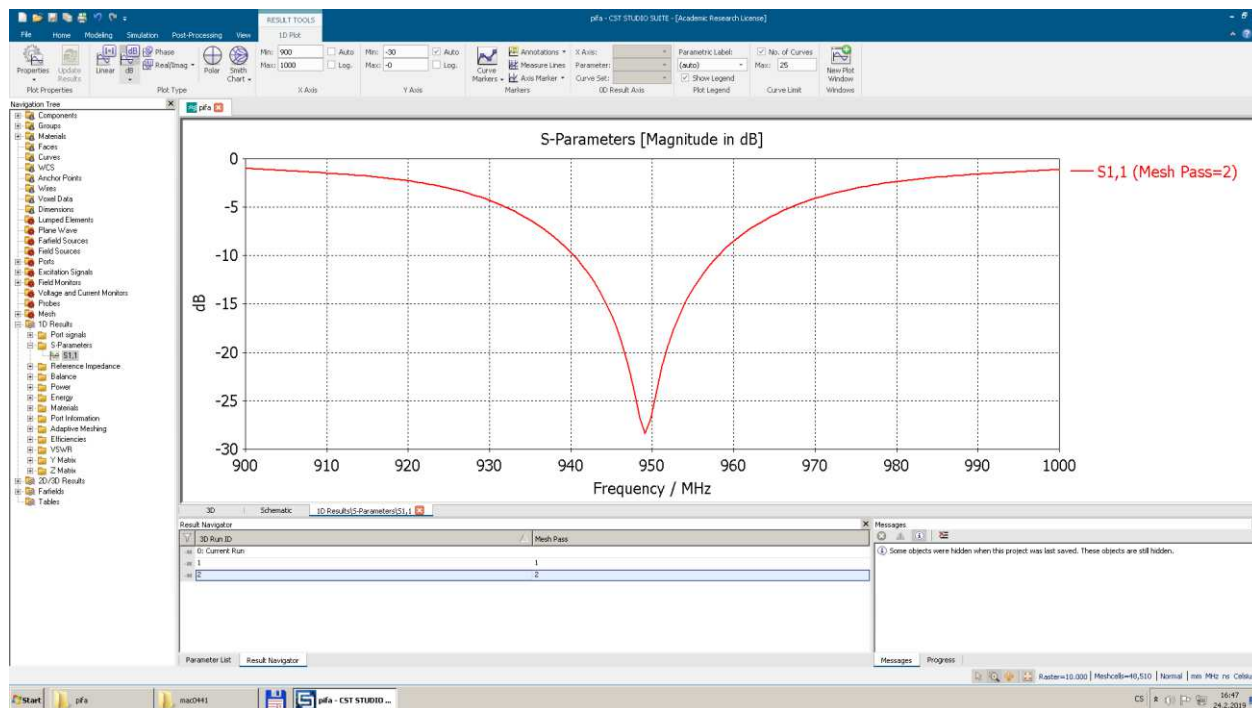
Postup měření:

1. Seznamte se s analyzátozem R&S ZND8. K dispozici máte dva tištěné návody a videa poskytnuté cvičícím.
2. Stanovte na analyzátoru kmitočtový rozsah **100 kHz až 5 GHz**.
3. Stisknutím tlačítka **SWEEP** nastavte **2001** generovaných bodů v rámci kmitočtového rozsahu.
4. Kalibrujte **PORT 1** pomocí **Ref1 OSM** metody. V návodu si vyhledejte všechny potřebné údaje, které jsou nutné pro správnou kalibraci.
5. Připojte vybranou anténu na **PORT 1**. Zvolte pro měření parametr S_{11} .
6. Vhodně **nastavte osu Y** a pomocí markeru naleznete nejmenší hodnotu parametru S_{11} . Výsledný diagram exportujte do grafického formátu a přidejte do protokolu.
7. Stejným způsobem vyhledejte nejmenší hodnotu **SWR**. Diagram přidejte do protokolu.
8. Pomocí **Smithova diagramu** a markeru odečtěte vstupní impedanci antény na kmitočtu, který bude přidělen cvičícím. Výslednou hodnotu zapište do protokolu.
9. V počítači naleznete na následující cestě **D:\student\MAC0441_BP** zip archiv s názvem PIFA_Jaburek. Extrahujte z tohoto archivu soubor **pifa.cst**.



10. Soubor spusťte v programu CST Studio.

11. V horním panelu klikněte na položku **Home** a stiskněte v nabídce možnost **Start Simulation**. V levém rohu klikněte na složku **1D Results**. V této složce klikněte na složku **S-Parameters**. V dolní části označte pouze **graf č. 2** (optimalizovaná anténa). Dále si **poznačte počáteční a koncový kmitočet** provedené simulace.

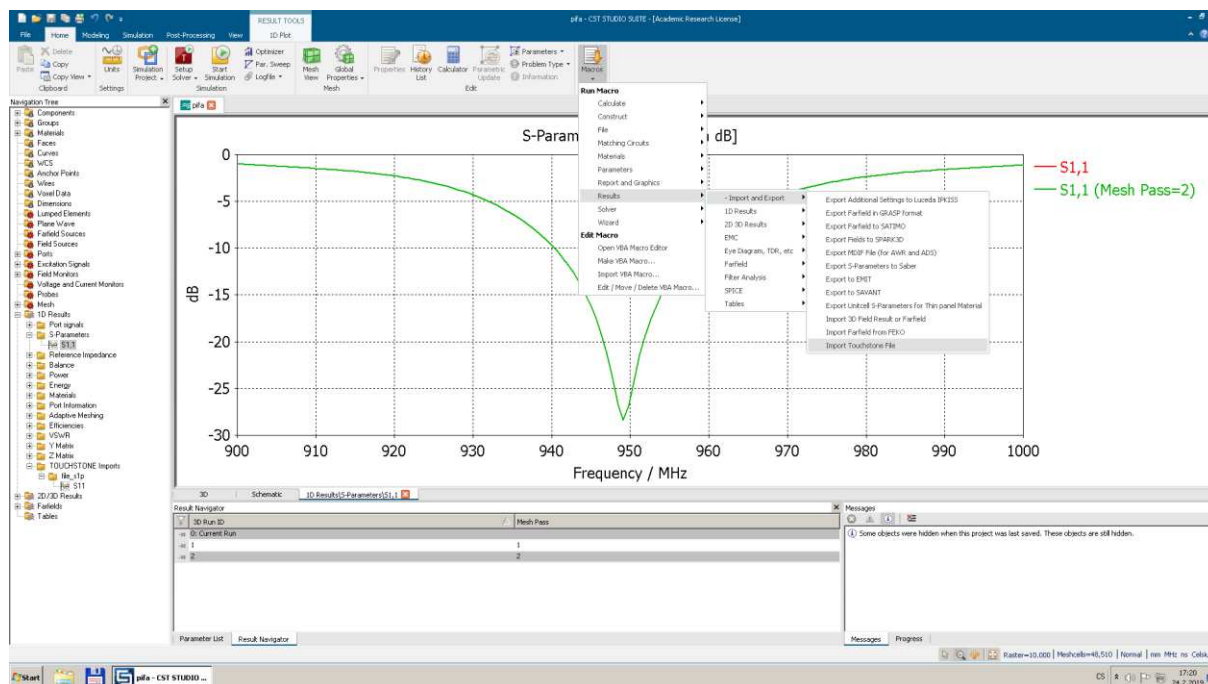


12. Na analyzátoru zúžte kmitočtový rozsah na zaznamenané rozmezí. Pro zúžení pásma využijte dva markery a podmenu **Set by Marker** (funkce **Start = Marker** a **Stop = Marker**).

13. Zobrazte na zúženém kmitočtovém rozmezí **Smithův diagram**. Diagram přidejte do protokolu.

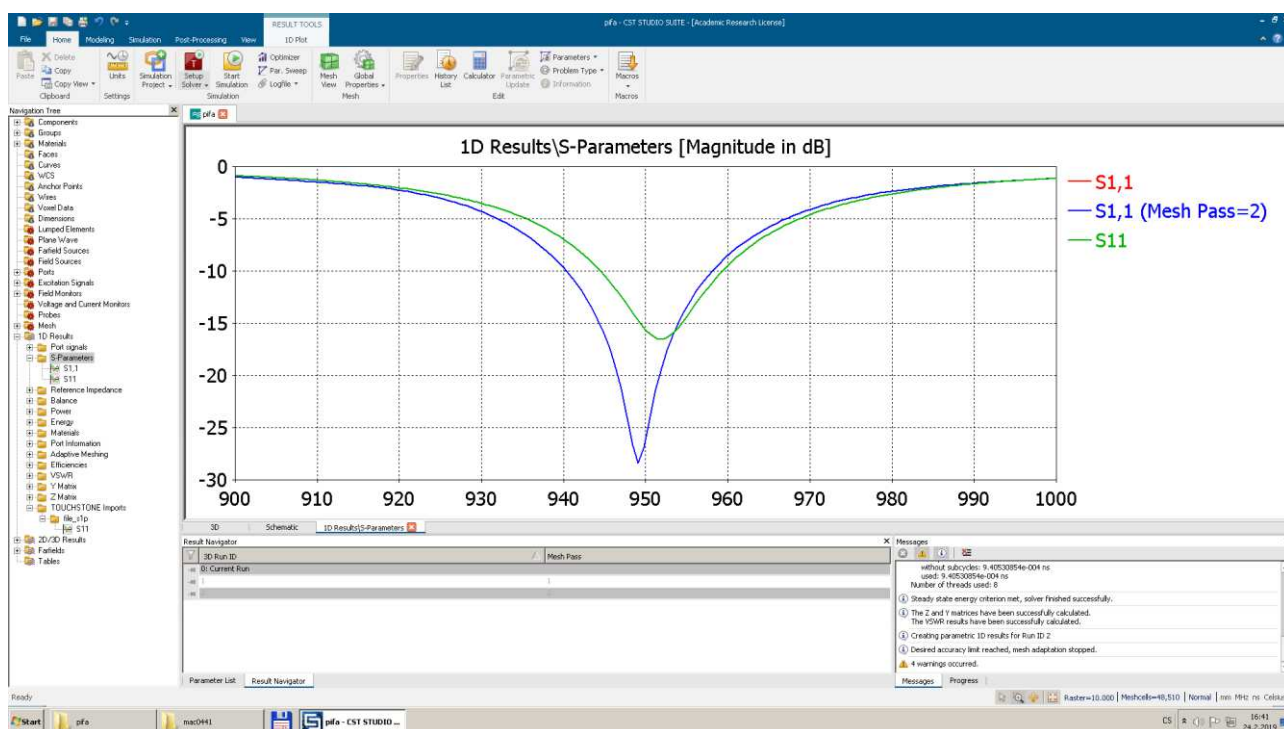
14. **Exportujte graf** do formátu **.s1p** (Touchstone file pro jednoportové S-parametry).

15. V programu **CST Studio** na horním panelu klikněte na položku **Home**. Najděte funkci **Macros**. Ve funkci **Macros** stiskněte možnost **Results -> Import and Export -> Import Touchstone File**. Vyberte a nainportujte uložený soubor.

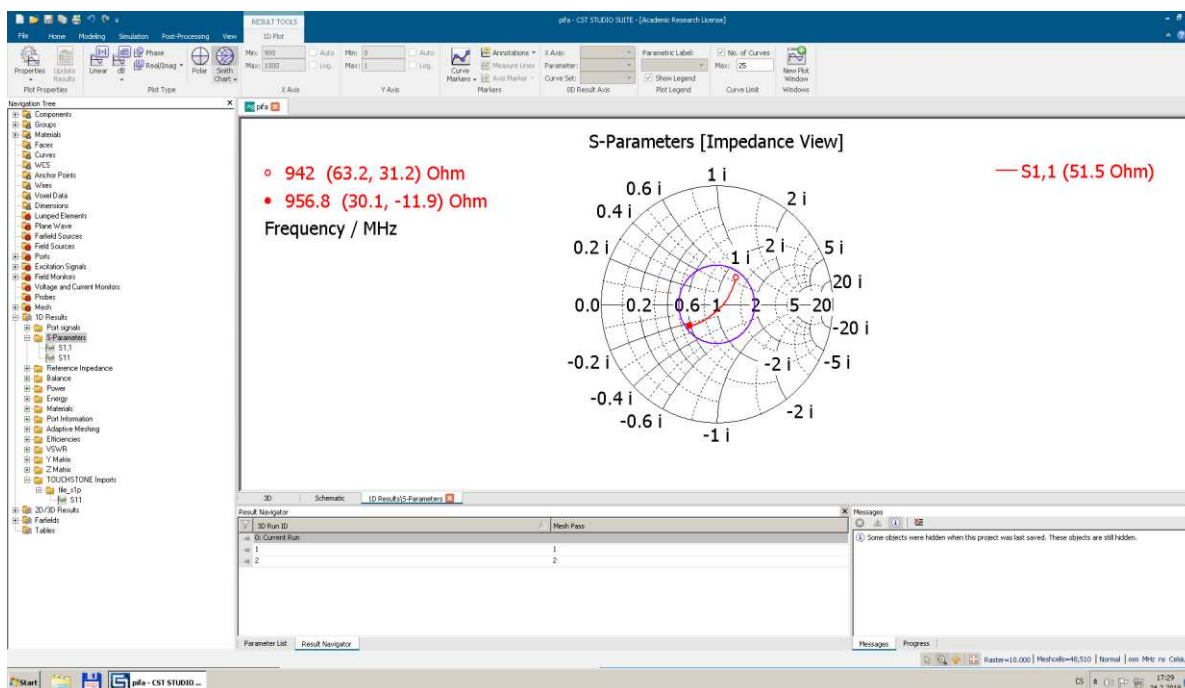


16. Zkopírujte importovaný soubor **S11** do složky **S-Parameters** (cesta k souboru **S11** v programu CST Studio: **TOUCHSTONE Imports** -> <Název importovaného souboru> -> **S11**).

17. Klikněte na složku **S-Parameters**. Zobrazený graf přidejte do protokolu.



18. Dále klikněte v horním panelu na kartu **1D Plot**. Klikněte na možnost **Smith Chart** -> **Z Smith Chart**. Smithův diagram simulované antény přidejte do protokolu.



Vyhodnocení:

1. V kmitočtovém rozsahu 100 kHz až 5 GHz nalezněte **nejmenší hodnotu parametru S_{11}** .
2. Zjistěte **nejmenší hodnotu SWR** v daném kmitočtovém rozsahu.
3. Na cvičícím určeném kmitočtu odečtěte **vstupní impedanci antény $Z = R_{in} \pm jX_{in}$** a v protokolu uveďte, jaký **přizpůsobovací obvod byste použili** pro přizpůsobení obvodu na daném kmitočtu k normované impedanci 50Ω .
4. Dále určete v kmitočtovém rozsahu 100 kHz až 5 GHz **kmitočtové pásmo, na kterém anténa nejlépe pracuje (rezonuje)**.
5. V rámci nalezeného pásma **vyhledejte a popište technologie**, pro které je vybraná anténa **optimalizována**.
6. Pokud je to možné, tak **vypište pořadové číslo a kmitočet kanálu**, který spadá do kmitočtu, na kterém má anténa nejmenší hodnotu SWR.
7. **Srovnejte** naměřené hodnoty parametru S_{11} se simulací, kterou jste provedli v programu CST Studio. **Porovnejte** exportované grafy a Smithovy diagramy.

Otázky pro studenty (teoretická příprava):

- Co znamená zkratka **SWR**? K čemu se tento parametr používá? Jaký je možný rozsah hodnot?
- Vysvětlíte pojem **rozptylové parametry**. Proč se zavádějí především v oblastech vysokých kmitočtů? Co určuje parametr S_{11} ? Jakou spojitost má tento parametr se **zpětným útlumem** (Return Loss)?
- Popište princip **impedančního přizpůsobení** antény k napáječi. Jaké možné **články** (přizpůsobovací obvody) znáte? Na čem závisí při správném výběru článku?
- Popište princip **kalibrace vektorového analyzátoru**. Proč je nutné vektorový analyzátor kalibrovat? Kdy je nutné zařízení kalibrovat? Co ovlivní přesnost používané kalibrace?
- Co to je **Smithův diagram**? Využití Smithova diagramu.
- Popište parametr **činitele odrazu**. Jakému rozptylovému parametru je ekvivalentní? Jakou hodnotu činitele odrazu má ideálně přizpůsobený obvod? V jaké části Smithova diagramu tuto hodnotu nalezneme?